

**UTILITY PATENT APPLICATION TRANSMITTAL**  
**(Only for new nonprovisional applications under 37 CFR 1.53(b))**

Docket No. : 35671/DBP/E43  
Inventor(s) : Markus Szymaniak  
Title : VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUM ELIMINIEREN  
UNERWUNSCHTER STUFUNGEN AN KANTEN BEI  
BILDDARSTELLUNGEN IM ZEILENRASTER  
Express Mail Label No. : EL368756754US

**ADDRESS TO:** Assistant Commissioner for Patents  
Box Patent Application  
Washington, D.C. 20231

Date: August 30, 1999

1. ☒ **FEE TRANSMITTAL FORM** *(Submit an original, and a duplicate for fee processing).*

2. **IF A CONTINUING APPLICATION**

\_\_\_ This application is a \_\_\_ of patent application No. .

\_\_\_ This application claims priority pursuant to 35 U.S.C. §119(e) and 37 CFR §1.78(a)(4), to provisional Application No. .

3. **APPLICATION COMPRISED OF**

**Specification**

65 Specification, claims and Abstract (total pages)

**Drawings**

44 Sheets of drawing(s) (FIGS. 1 to 67 and TAB. 1 to 33)

**Declaration and Power of Attorney**

\_\_\_ Newly executed

☒ No executed declaration (unexecuted copy enclosed)

\_\_\_ Copy from a prior application (37 CFR 1.63(d))(for continuation and divisional)

4. \_\_\_ **Microfiche Computer Program** *(Appendix)*

5. \_\_\_ **Nucleotide and/or Amino Acid Sequence Submission** *(if applicable, all necessary)*

\_\_\_ Computer Readable Copy

\_\_\_ Paper Copy (identical to computer copy)

\_\_\_ Statement verifying identity of above copies

6. **ALSO ENCLOSED ARE**

\_\_\_ Preliminary Amendment

\_\_\_ A Petition for Extension of Time for the parent application and the required fee are enclosed as separate papers

\_\_\_ Small Entity Statement(s)

\_\_\_ Statement filed in parent application, status still proper and desired

\_\_\_ Copy of Statement filed in provisional application, status still proper and desired

---

**UTILITY PATENT APPLICATION TRANSMITTAL**  
**(Only for new nonprovisional applications under 37 CFR 1.53(b))**

---

Docket No.: 35671/DBP/E43

---

- ☐ An Assignment of the invention with the Recordation Cover Sheet and the recordation fee are enclosed as separate papers
- ☐ This application is owned by pursuant to an Assignment recorded at Reel , Frame
- ☐ Information Disclosure Statement (IDS)/PTO-1449
- ☐ Copies of IDS Citations
- ☐ Certified copy of Priority Document(s) (*if foreign priority is claimed*)
- ☐ English Translation Document (*if applicable*)
- ☒ Return Receipt Postcard (MPEP 503) (should be specifically itemized).
- ☐ Other

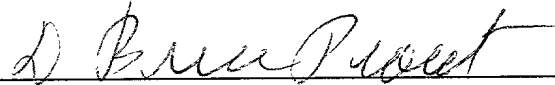
**7. CORRESPONDENCE ADDRESS**

***CHRISTIE, PARKER & HALE, LLP, P.O. BOX 7068, PASADENA, CA 91109-7068***

Respectfully submitted,

CHRISTIE, PARKER & HALE, LLP

By

  
D. Bruce Prout  
Reg. No. 20,958  
626/795-9900

DBP/sfc

Pacellallee 43/45  
D-14195 Berlin  
Tel. +49-(0)30-841 8870  
Fax +49-(0)30-8418 8777  
mail@eisenfuhr.com

**Bremen**  
 Patentanwälte  
 European Patent Attorneys  
 Dipl.-Ing. Günther Eisenfuhr  
 Dipl.-Ing. Dieter K. Speiser  
 Dr.-Ing. Werner W. Rabus  
 Dipl.-Ing. Jürgen Brugge  
 Dipl.-Ing. Jürgen Klinghardt  
 Dipl.-Ing. Klaus G. Goken  
 Jochen Ehlers  
 Patentanwalt  
 Dipl.-Ing. Mark Andres

Rechtsanwälte  
Ulrich H. Sander  
Sabine Richter

**Hamburg**  
Patentanwalt  
Dipl.-Phys. Frank Meier

Rechtsanwälte  
Christian Spintig  
Rainer Böhm

**München**  
 Patentanwälte  
 European Patent Attorneys  
 Dipl.-Wirtsch.-Ing. Rainer Fritsche  
 Lbm.-Chem. Gabriele Leißler-Gerstl  
 Patentanwalt  
 Dipl.-Chem. Dr. Peter Schuler

**Alicante**  
European Trademark Attorney  
Dipl.-Ing. Jürgen Klinghardt

Berlin, den 03. Juli 1999

Unser Zeichen: GB8054 JVO/WWR/oe

Anmelder/Inhaber: GMD - Forschungszentrum Informationstechnik GmbH  
 Aktenzeichen: Neuanmeldung

GMD - Forschungszentrum Informationstechnik GmbH,  
Schloß Birlinghoven, 53757 Sankt Augustin

## Verfahren und Vorrichtung zum Eliminieren unerwünschter Stufungen an Kanten bei Bilddarstellungen im Zeilenraster

Die Erfindung betrifft ein Verfahren gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 1 sowie eine entsprechende Vorrichtung.

3D-Graphikapplikationen, wie Virtual Reality, 3D-Spiele oder im professionelleren Umfeld Modellierung und Animation, gehören bereits heute zu den Standardanwendungen auf PCs. Voraussetzung für die Echtzeitfähigkeit in diesem Gebiet ist die extreme Leistungssteigerung der Prozessoren in den letzten Jahren sowie neuerdings der Einsatz 3D-Graphik-Beschleunigern, die spezielle, wiederkehrende Arbeiten in der Graphikgenerierung übernehmen. Dem Prozessor fällt lediglich noch die Aufgabe zu, die Geometriebeschreibung der darzustellenden Szene zu generieren, alles weitere, wie die Rasterisierung (Erzeugung der anzuzeigenden Pixel) und das Shading (Farbgebung der Pixel) werden vom Beschleuniger übernommen.

Bis eine im Computer modellierte Szene auf dem Bildschirm dargestellt werden kann, bedarf es mehrerer Schritte:

1. Die im Speicher abgelegten Datensätze der darzustellenden Objekte müssen transformiert (skaliert, rotiert) und an den richtigen Stellen in der virtuellen Szene platziert werden (modeling transformation).
2. Ausgehend von der Position der Objekte bezüglich des Blickwinkels des Betrachters werden nun Objekte verworfen und damit nicht weiterberücksichtigt, die garantiert nicht sichtbar sein können. Dabei werden sowohl ganze Objekte eliminiert, die sich außerhalb des sichtbaren Volumens befinden (clipping), als auch einzelne Polygone von Objekten, die dem Betrachter abgewendet sind (backface removal).
3. Die in Weltkoordinaten modellierten Polygone (meist Dreiecke) müssen nun in das Bildkoordinatensystem überführt werden, wobei eine perspektivische Verzerrung erfolgt, um eine möglichst realistische Abbildung zu ermöglichen (viewing transformation).
4. Die nun in Bildkoordinaten vorliegenden Polygone müssen so aufbereitet werden, daß sie durch den Renderer verarbeitet werden können (z.B. Berechnung von Steigungen an Kanten, usw. / setup processing).
5. Im Rasterisierer erfolgt dann eine Berechnung der sichtbaren Pixel auf dem Bildschirm. Pro Pixel wird nicht nur die Position auf dem Bildschirm (x, y)



berechnet, sondern es erfolgt auch die Bestimmung weiterer für die Beleuchtung und Verdecktheitsanalyse benötigter Parameter (z-Wert, homogener Parameter, Texturkoordinaten, Normalen, usw. / rasterization)

6. Aufgrund der berechneten Parameter werden nun die Farbwerte der darzustellenden Pixel ermittelt (lighting). Dieser Schritt wird hier nur dann durchgeführt, wenn es sich um ein Phong-Renderer handelt. Ist nur ein Gouraud-Renderer vorhanden, so wird dieser Schritt bereits vor der Transformation ins Bildkoordinatensystem durchgeführt.
7. Die berechneten Farbwerte werden dann im Framebuffer gespeichert, wenn der z-Wert des Pixels angibt, daß das Pixel sich vor dem an dieser Position im Framebuffer stehendem Pixel befindet (z-buffering). Vor der Speicherung können die Farbwerte mittels des Blendings mit dem vorher im Framebuffer stehen Wert modifiziert werden, wodurch z.B. die Modellierung von halb transparenten Objekten möglich wird.
8. Sind alle sichtbaren Dreiecke rasterisiert worden, so befindet sich im Framebuffer das auf dem Bildschirm darzustellende Bild. Über die RAMDAC wird das Bild linear aus dem Speicher ausgelesen und in analoge Signale gewandelt, die direkt an den Monitor geschickt werden (display process).

Das Problem des Aliasing entsteht aus der heute üblichen Verwendung von Rasterdisplays, da es mit diskreten Punkten nicht möglich ist, beispielsweise eine geneigte Kante exakt darzustellen. Bei der "normalen" Scankonvertierung wird ein Pixel (picture element) immer dann gesetzt, wenn der Pixelmittelpunkt bedeckt ist, wodurch aus einer kontinuierlichen Kante im diskreten Fall in bestimmten Abständen sichtbare Sprünge entstehen, die bei bewegten Bildern besonders auffallen, da sie über die Kante wandern. So tritt zum Beispiel bei der Bewegung einer fast horizontalen Kante der irritierende Effekt auf, daß, wenn die Kante langsam vertikal verschoben wird, die Sprünge schnell horizontal über die Kante laufen. Es scheint also weder die Bewegungsrichtung noch die Bewegungsgeschwindigkeit zu stimmen.

Aus der Signalverarbeitung ist bekannt, daß sich ein Signal (in diesem Fall das Bild) nur dann korrekt reproduzieren läßt, wenn die Abtastrate größer als das Doppelte der maximal auftretenden Frequenz ist (Abtasttheorem von Shannon). Da aber die Abtastrate durch die Bildschirmauflösung fest vorgegeben ist, werden als

Umkehrschluß nur Frequenzen unterhalb der halben Abtastrate korrekt wiedergegeben; alle Frequenzen darüber tragen zum Aliasing bei.

Das Problem des klassischen Samplings besteht also darin, daß ein Pixel immer als Punkt betrachtet wird, wodurch sich auch der Name Point-Sampling ergibt. Allen Antialiasing-Ansätzen gemein ist, daß das Pixel nun als etwas Flächenhaftes gesehen wird; die Farbe sich ergo aus der Mittelung der Farbgebung der bedeckten Pixelfläche ergeben sollte. Das Antialiasing versucht nun die darstellungsbedingten Probleme soweit wie möglich zu beseitigen, oder zumindest abzuschwächen.

Bei Aliasing an Polygonkanten sind nicht alle Polygonkanten betroffen, sondern nur solche, die sind an den Rändern von Objekten befinden. Innerhalb von Objekten passen die Polygone in der Regel nahtlos aneinander, und sofern benachbarte Polygone eine ähnliche Farbgebung besitzen, ist es an den Kanten zwischen den Polygonen nicht von Bedeutung, ob die Pixel von dem einen oder dem anderen Polygon gesetzt werden.

Sehr kleine Objekte können verschwinden, falls ihre Ausdehnung kleiner als ein Pixel ist. Dieser Effekt fällt besonders dann auf, wenn durch eine kleine Verschiebung das Objekt sichtbar wird, da auf einmal ein Pixelmittelpunkt berührt wird. Es entsteht eine Art Blinkereffekt, der die Aufmerksamkeit des Betrachters auf sich lenkt.

Bei modernen Phong-Renderern treten zusätzliche Aliasing-Effekte an den Spot-Grenzen auf. Bei Gouraud-Renderern tritt dieses Problem nicht auf, da bei ihnen keine Lichteffekte wie die hier gezeigten möglich sind, wodurch die Bildqualität nicht vergleichbar ist.

Der am weitesten verbreitete Ansatz für das Antialiasing ist das Supersampling. Jedes Pixel wird in  $(n \times n)$  Subpixel unterteilt, die dann wiederum normal "gepointsampelt" werden. Es ergibt sich ein Zwischenbild, welches in beiden Dimensionen die  $n$ -fache Auflösung des darzustellenden Bildes besitzt. Durch Aufsummierung der Farbwerte der  $(n \times n)$  Subpixel und der anschließende Division durch die Anzahl der Subpixel ( $n^2$ ) ergibt sich dann die endgültige Farbe des Pixels. Aus Sicht der Signalverarbeitung wird die Abtastrate um den Faktor  $n$  (auch Oversamplingfaktor genannt) erhöht, wodurch kleinere Details rekonstruiert werden können. Sinnvolle Werte für  $n$  liegen im Bereich 2 bis 8, wodurch zwischen 4 und 64 Farbwerte pro Pixel zur Verfügung stehen.

Trotz der Einfachheit dieses Vorgehens gibt es entscheidende Nachteile, aufgrund derer eine Realisierung in Hardware nicht erreicht werden konnte:

1. Speicherbedarf: Da das Bild in einer  $n$ -fachen Auflösung gerendert wird, muß nicht nur der Framebuffer, sondern auch der z-Buffer (24 - 32Bit/Pixel)  $n$ -fach ausgelegt sein.

Beispielsweise ergibt sich für eine Bildschirmauflösung von 1024 x 768 Pixel und einen Oversamplingfaktor von  $n=4$  ein Speicherbedarf von 48 MB für den Framebuffer und 36 MB noch einmal für den z-Buffer. Insgesamt werden also 84 MByte Speicher gegenüber 5,25 MB für das normale Sampling benötigt.

2. Rechenzeitaufwand: Aufgrund der höheren Anzahl der zu erzeugenden Pixel nimmt die Rechenzeit ebenfalls um den Faktor  $n^2$  zu. War das System also vorher in der Lage, 16 Bilder pro Sekunde anzuzeigen, so kommt es bei  $n=4$  nur noch auf ein Bild pro Sekunde; es hat seine Echtzeitfähigkeit also verloren.

Das Verfahren kann zudem nicht garantieren, daß das entstehende Bild frei von Artefakten ist, denn zu jeder Samplingrate läßt sich leicht ein Bild konstruieren, welches garantiert falsch dargestellt wird. Hat das darzustellende Bild eine horizontale Auflösung von  $w$ , so wird ein senkrechtes Streifenmuster aus  $(n \times w)$  schwarzen und  $(n \times w)$  weißen Balken, entweder komplett schwarz oder komplett weiß dargestellt.

Beim stochastischen Supersampling werden die Samplepoints zufällig über das Pixel verteilt, wodurch die übrig gebliebenen Artefakte mit einem Rauschen überlagert werden, welches für das menschliche Auge angenehmer ist.

Ein Bild, welches vierfach mit einem stochastischen Ansatz gerendert wurde, hat in etwa die gleiche Bildqualität, wie ein 16faches Supersampling an einem regulären Raster.

Das Verfahren ist jedoch auf eine Anwendung in Software beschränkt, da Hardware-Renderer ausschließlich mit inkrementellen Verfahren arbeiten. Bei beliebig platzierten Samplepoints gibt es keine feste Reihenfolge der Punkte mehr, so daß die Bearbeitung nicht mehr inkrementell erfolgen kann, sondern die Parameter pro Punkt komplett neu berechnet werden müßten, was einen extremen Aufwand bedeutet.

Bei dem Nachbearbeitungsdurchgang müssen nicht alle Subpixel gleich behandelt werden; bei der Aufsummierung der Farbwerte kann noch ein Faktor eingebracht werden, der angibt, wie wichtig das Subpixel für das Pixel ist. Die Faktoren werden nach der Gauß-, Poisson- oder einer anderen Verteilung ermittelt, bei denen in der Regel Subpixel, die näher am Pixelmittelpunkt liegen, ein höheres Gewicht erhalten.

Supersampling erfolgt in seiner Grundform über das gesamte Bild immer mit der gleichen Abtastrate. In flächigen Bereichen ist jedoch viel Rechenzeit erforderlich, da dort jedes Subpixel den gleichen Farbwert beisteuert. Die Idee besteht dabei darin, Supersampling nur dort zu betreiben, wo es wirklich nötig ist. In einem ersten Durchgang wird das Bild normal gerendert, und in einem zweiten Durchlauf wird dann jeder Farbwert mit den Farbwerten aus seiner Umgebung verglichen, und nur sofern die Differenz einen vorgegebener Schwellwert übersteigt, erfolgt nun ein Supersampling für dieses Pixel. Der Nachteil bei diesem Vorgehen ist natürlich das zweimalige Rendern eines jeden Polygons.

Der Accumulationbuffer ist eine Abwandlung des vorgenannten Supersamplings, bei dem der extreme Speicherbedarf vermieden wird. Es wird lediglich zu dem sowieso vorhandenen Frame- bzw. z-Buffer ein zusätzlicher Buffer von der Größe des Framebuffers benötigt, der jedoch eine etwas höhere Genauigkeit braucht. Das Rendern eines Bildes benötigt nun  $n^2$  Renderdurchgänge bei der normalen Framebufferauflösung, wobei  $n$  wiederum den Oversamplingfaktor darstellt. Zwischen den Berechnungen der Teilbilder wird jeweils das Koordinatensystem der zu beschreibenden Geometrie im Subpixelbereich so verschoben, daß die Pixelmittelpunkte jeweils auf einem anderen Sample des entsprechenden Supersampling-Verfahrens zu liegen kommen. Die bei jedem Rendering-Durchlauf erzeugten Framebuffer-Inhalte werden im zusätzlichen Buffer akkumuliert (daher der Name Accumulationbuffer), worauf sich das Löschen des Frame- und z-Buffer für das nächste Teilbild anschließt. Da im Accumulationbuffer  $n^2$  Farbwerte pro Pixel aufsummiert werden, sind zu der Framebuffergenauigkeit noch einmal  $2 \cdot \log_2 n$  Genauigkeitsbits zusätzlich erforderlich, damit kein Überlaufen der Farbwerte möglich ist. Sobald alle Teilbilder gerendert wurden, werden die Farbwerte aus dem Accumulationbuffer durch die Anzahl der Samples ( $n^2$ ) geteilt, und in den Framebuffer übernommen, der dann angezeigt werden kann.

Durch den Einsatz des Accumulationbuffers anstelle des beim Supersamplings riesigen Framebuffers wird der Nachteil des großen Speicherbedarfs beseitigt, nicht jedoch der Bedarf an Rechenzeit. Im Gegenteil wird sich die Renderingzeit sogar

noch erhöhen, da nun die Geometriebeschreibungen (meist Dreiecke) nun mehrmals an den Renderer übertragen werden müssen.

Das Areasampling, entwickelt von Edwin Catmull [Edwin Catmull: "A hidden-surface algorithm with antialiasing", Aug.78], basiert darauf, daß pro Pixel die Fläche berechnet wird, welche auf die einzelnen Polygone entfällt. Dies geschieht auf analytischem Wege, so daß jedes noch so kleine Polygon in Betracht gezogen wird, und liefert eine dementsprechend hohe Bildqualität.

Der Ablauf des Algorithmus läßt sich in etwa so beschreiben:

- Alle Polygone werden nach ihrer größten y-Koordinate geordnet.
- Es wird eine Liste von aktiven Polygonen verwaltet, in die Polygone eingetragen werden, sobald die Scanline mit dem größtem y-Wert erreicht ist, und aus der sie wieder gelöscht werden, sobald der minimale y-Wert unterschritten wird.
- Pro Scanline, wobei eine Scanline hierbei als etwas Flächenhaftes betrachtet wird, muß pro Pixel ein Bucket angelegt werden, in dem jeweils alle Polygon-teile eingetragen werden, die zu diesem Pixel beitragen. Die Polygonanteile werden dabei wieder durch Polygone repräsentiert, die gegenüber den Pixelkanten geclippt wurden. Beim Aufbau der Buckets wird darauf geachtet, daß die jeweiligen Polygone entsprechend ihrer z-Werte einsortiert werden.
- Pro Pixel wird nun mit Hilfe des sogenannten "Hidden-Surface-Algorithmus" von Sutherland die sichtbare Fläche der einzelnen Polygone bestimmt, deren Farben dann gewichtet die endgültige Pixelfarbe ergeben.

Gegen eine derartige Hardwarerealisierung spricht der extreme Rechenaufwand für die Bestimmung der sichtbaren Flächenanteile bei länger werdenden Listen, sowie die scanline-basierte Vorgehensweise bei der Rasterisierung.

Der A-Buffer-Algorithmus [Loren Carpenter: "The a-buffer, an antialiased hidden surface method", Computer Graphics 12, 84]) stellt die diskrete Realisierung des Areasamplings dar, bei der nicht die exakte Fläche der Polygone abgespeichert wird, sondern nur Subpixelmasken, die eine Approximation der Flächen darstellen. Zudem erfolgt die Traversierung polygonweise, so daß wiederum ein Framebuffer benötigt wird, der jedoch eine dynamische Liste pro Pixel aufnehmen muß, in der

die Subpixelmasken mitsamt ihren Farbwerten gespeichert werden. Pro Subpixelmaske wird dabei entweder nur ein z-Wert (der vom Mittelpunkt des Pixels) oder zwei z-Werte (minimal und maximal auftretender z-Wert im Pixel) abgespeichert, um den Speicheraufwand zu begrenzen. Sobald alle Polygone behandelt worden sind, werden in einem weiteren Durchlauf durch das Bild die Subpixelmasken aufgrund der z-Werte verrechnet, so daß der endgültige Farbwert entsteht.

Der konstant hohe Speicherbedarf des Supersamplings wurde somit durch einen sich dynamisch der Komplexität der Szene anpassenden Speicherbedarf ersetzt. Aufgrund dieses dynamischen Verhaltens und der daraus resultierenden Traversierung von Listen eignet sich dieses Verfahren kaum für eine Hardware-Implementierung. Weiterhin stellt sich die Verdecktheitsanalyse anhand der begrenzten Anzahl der z-Werte als problematisch heraus. In [Andreas Schilling und Wolfgang Straßer: "EXACT: Algorithm and Hardware Architecture for an Improved A-Buffer", Computer Graphics Proceedings, 93] wird eine mögliche Lösung mittels der zusätzlichen Speicherung von  $dz/dx$  und  $dz/dy$  auf Subpixelebene aufgezeigt.

Beim Approximationbuffer von Lau [Wing Hung Lau: "The antialiased approximation buffer", Aug.94] findet ebenfalls der A-Buffer-Ansatz Verwendung, wobei jedoch die Anzahl der pro Pixel gespeicherten Fragmente auf zwei beschränkt wird. Es ergibt sich somit ein konstanter Speicheraufwand, der jedoch mit Verlusten in der Bildqualität erkaufte wird. So werden nur noch Pixel korrekt behandelt, die maximal von zwei Polygonen bedeckt sind, da mehr Anteile nicht darstellbar sind. Das Verfahren ist demnach auf wenige, große Polygone beschränkt, da dann der Fall von mehr als zwei Fragmenten praktisch nur noch sehr selten auftritt (unter 0,8% laut Lau), und somit die Qualität der Ergebnisbilder ausreichend gut ist.

Der Exact Area Subpixel Algorithm (EASA von Andreas Schilling [Andreas Schilling: "Eine Prozessor-Pipeline zur Anwendung in der graphischen Datenverarbeitung", Dissertation an der Eberhard-Karls-Universität in Tübingen, Juni 94]) stellt eine Modifikation des A-Buffers dar, bei dem eine höhere Genauigkeit an Kanten eines Polygons erreicht wird. Die Generierung der Subpixelmasken erfolgt beim A-Buffer aufgrund der Bedeckung der Subpixelmittelpunkte. Schilling hingegen berechnet den exakten Flächenanteil, woraus eine Anzahl zu setzender Subpixel abgeleitet wird, die dann zur Generierung der eigentlichen Maske anhand der Steigung der Kante führt. Durch dieses Vorgehen kann eine höhere Auflösung bei fast horizontalen (vertikalen) Kanten erreicht werden, da beim A-Buffer immer mehrere Subpixel auf einmal gesetzt werden, so daß nicht die maximale Auflösung der Subpixelmaske

ausgenutzt werden konnte.

Das Verfahren von Patrick Baudisch [Patrick Baudisch: "Entwicklung und Implementierung eines effizienten, hardwarenahen Antialiasing-Algorithmus", Diplomarbeit, Technische Hochschule Darmstadt, Sept.94]) basiert ebenfalls auf Subpixelmasken, die an Polygonkanten generiert werden. Jedoch dienen sie hierbei nicht dazu, die Fläche der einzelnen Polygone zu berechnen und deren Farbe damit entsprechend zu gewichten wie bei den vorigen Verfahren, sondern um aus einem normal gepointsamplen Bild die benachbarten Farben zuzumischen. Als Grundlage dient die räumliche Kohärenz der Pixel, d.h., daß die Farbe, die ein Polygon teilweise zu einem Pixel beiträgt, garantiert in einem benachbarten Pixel zu finden ist. Die Position der Subpixel in der Maske gibt an, aus welchem benachbartem Pixel eine Zumischung erfolgen soll, sofern es gesetzt wird. Die Subpixel auf den Diagonalen verweisen dabei auf zwei benachbarte Pixel.

Beim Vier-Zeiger-Verfahren werden jeweils 4 Subpixel zu einem Meta-Subpixel zusammengefaßt, welches wiederum die Zumischung der benachbarten Pixelfarbe angibt. Durch das Zusammenfassen geht die räumliche Information verloren, die Genauigkeit der Flächenanteile erhöht sich aber. Die bisherigen Antialiasing-Verfahren haben insgesamt Nachteile in bezug auf ihre mögliche Hardware-Realisierbarkeit, die nur schwer behoben werden können. Einerseits muß ein enormer Speicheraufwand betrieben werden (Supersampling, Area-sampling, A-Buffer), und andererseits ist der Rechenaufwand einiger Verfahren so hoch (Supersampling, Accumulationbuffer, Areasampling), daß eine Hardware-Realisierung kaum noch echtzeitfähig ist. Zudem werden bei Verfahren, die ausschließlich auf Polygonkanten arbeiten, (Areasampling, A-Buffer, Approximationbuffer, EASA, Subpixelverfahren, Vier-Zeiger-Verfahren) Billboard- und Spot-Artefakte nicht berücksichtigt.

Die beim Stand der Technik bestehenden Probleme sollen nachfolgend noch einmal kurz zusammengefaßt werden:

Das Problem des Aliasing entsteht aus der Verwendung von Rasterdisplays, da es mit diskreten Punkten nicht möglich ist, z.B. eine geneigte Kante exakt darzustellen. Bei normalen Rasterisierungsmethoden entstehen aus einer kontinuierlichen Kante im diskreten Fall in bestimmten Abständen Sprünge, die den visuellen Eindruck stark stören.

- a) Anwendung eines Kantenoperators auf einen Bildteil zur Grobermittlung mindestens eines gerasterten Kantenverlaufs,
- b) Bestimmung der Position mindestens eines ersten Pixels aus der Menge derjenigen Pixel, die den gerasterten Kantenverlauf bilden oder



an diesem gerasterten Kantenverlauf angrenzen,

- c) Approximation einer Geraden zur Ermittlung eines wahrscheinlichen Verlaufs der ungerasterten Bildkante in der Nähe des ersten Pixels,
- d) Ermittlung eines Kriteriums aus der Approximationsgeraden und der Position des ersten Pixels für die Zumischung einer Farbe X zu der Farbe C im betrachteten ersten Pixels und
- e) Mischung der ermittelten Farbe X zu der Farbe C im betrachteten ersten Pixel.

Gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform ist das erfindungsgemäße Verfahren dadurch gekennzeichnet, daß das Kriterium des Verfahrensschrittes d) in Abhängigkeit von der Lage des betrachteten Pixels relativ zur Approximationsgeraden festlegt, welche Farbe X zu der Farbe C des betrachteten Pixels zugemischt wird.

Gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform ist das erfindungsgemäße Verfahren dadurch gekennzeichnet, daß das Kriterium gemäß Verfahrensschritt d) in Abhängigkeit von der Lage des betrachteten Pixels relativ zur Approximationsgeraden festlegt, daß die Farbe mindestens eines benachbarten Pixels gewichtet zur Farbe des betrachteten Pixels zugemischt wird.

Gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform ist das erfindungsgemäße Verfahren dadurch gekennzeichnet, daß bei einem betrachteten Pixel, das von der Approximationsgeraden nicht geschnitten wird, die Farbe unverändert bleibt.

Gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform ist das erfindungsgemäße Verfahren dadurch gekennzeichnet, daß bei einem betrachteten Pixel, das von der Approximationsgeraden geschnitten wird, die resultierende Farbe R nach Maßgabe des folgenden Kriteriums bestimmt wird:

die Approximationsgerade teilt das betrachtete Pixel in zwei Teilflächen  $F_1$ ,  $F_2$ , wobei  $F_1 + F_2 = 1$ , mit 1 ist die Gesamtfläche des Pixels, wobei  $F_1$  diejenige Teilfläche ist, in welcher der Pixelmittelpunkt liegt;

- zugemischt wird zu der Farbe C des betrachteten Pixels die Farbe X

desjenigen benachbarten Pixels, welche an die längste vom Raster gebildete Kante der Teilfläche  $F_2$  angrenzt.

Gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform ist das erfindungsgemäße Verfahren dadurch gekennzeichnet, daß sich die resultierende Farbe R aus der ursprünglichen Farbe C des betrachteten Pixels und der zugemischten Farbe X eines benachbarten Pixels nach folgender Gleichung ergibt:

$$R = F_1 \times C + F_2 \times X$$

Gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform ist das erfindungsgemäße Verfahren dadurch gekennzeichnet, daß die Teilflächen  $F_1, F_2$  durch ein geeignetes Approximationsverfahren approximiert werden.

Gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform ist das erfindungsgemäße Verfahren dadurch gekennzeichnet, daß die genannten Verfahrensschritte auf einen mittels eine Rendering und/oder Shading-Verfahrens behandelten Bildteil angewendet werden.

Gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform ist das erfindungsgemäße Verfahren dadurch gekennzeichnet, daß das Shading/Rendering dreiecks- oder Scanlinebasiert ist, oder daß es sich um ein Gouraud-oder Phong-Shading handelt.

Gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform ist das erfindungsgemäße Verfahren dadurch gekennzeichnet, daß die vorgenannten Verfahrensschritte a) bis e) einzeln oder in Gruppen im zeitlichen Versatz ausgeführt werden.

Gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform ist das erfindungsgemäße Verfahren dadurch gekennzeichnet, daß der zeitliche Versatz mindestens eine Bildzeile beträgt.

Gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform ist das erfindungsgemäße Verfahren dadurch gekennzeichnet, daß die Verarbeitung im zeitlichen Versatz in einem Framebuffer ohne weitere Zwischenspeicherung erfolgt.

Gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform ist das erfindungsgemäße Verfahren dadurch gekennzeichnet, daß die Approximationsgerade über mehrere Stufen des gerasterten Kantenverlaufs verläuft, und daß die Approximationsgerade



4) Bei der unter 3. erhaltenen Sequenz darf nur eine der beiden möglichen Zahlen mehrmals hintereinander auftreten.

Gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform ist das erfindungsgemäße Verfahren gekennzeichnet durch das Vorsehen eines Tripple-Buffers, wobei sich die drei resultierenden Buffer in zyklischer Vertauschung parallel die Verfahrensschritte Rendering, Post-Antialyasing und Bildwiedergabe teilen.

Bei der Rasterisierung eines Dreiecks unter Verwendung der normalen Scankonvertierung, wird ein Pixel immer dann in der Farbe des Dreiecks gefärbt, wenn der Pixelmittelpunkt innerhalb der Dreiecksfläche liegt, anderenfalls erhält das Pixel die Hintergrundfarbe. Hierbei entstehen an den Kanten des Dreiecks sichtbare Sprünge, die den visuellen Eindruck einer geraden Kante stark stören. Nach dem erfindungsgemäßen Verfahren wird nun den Pixeln an den Kanten des Dreiecks eine gemischte Farbe gegeben, welche zwischen der Farbe des Dreiecks und der Hintergrundfarbe liegt. Hierbei wird die flächenmäßigen Bedeckung des Pixels als Kriterium herangezogen. Durch dieses Vorgehen lassen sich alle ungewollten Stufeneffekte vermeiden, wodurch die Qualität des Bildes merklich heraufgesetzt wird.

Für die Mischung der Farben wird also die bedeckte Fläche der einzelnen Farbanteile benötigt, die bei herkömmlichen Antialiasing-Verfahren während der Rasterisierung bestimmt wird. Die Information, welche Flächenanteile auf die einzelnen Seiten der Kante entfallen, läßt sich auch aus einem normal gerendertem Bild im nachhinein

bestimmen. Da die Entscheidung über das Setzen eines Pixels immer aufgrund seines Pixelmittelpunktes getroffen wird, läßt sich aus der entstandenen Stufensequenz an der Kante recht genau die reale Kante rekonstruieren. Aus der realen Geraden können dann wieder die Flächenanteile, die auf die einzelnen Seiten der Kante entfallen, bestimmt werden.

Für das betrachtete Pixel steht nun zunächst nur eine Farbe zur Verfügung, nämlich diejenige, die sich bei der Rasterisierung ergeben hat. Durch Einbeziehung der Nachbarpixel ist dabei zusätzlich auch die Farbe auf der anderen Seite der Kante zur Verfügung, sofern von einer räumlichen Kohärenz ausgegangen wird.

Die Ergebnisbilder eines Pointsampling-Verfahrens (Rendering der Bilder bei normaler Auflösung) werden also zunächst einer Kantenerkennung unterzogen, aufgrund derer dann Kanten im Bild erkannt und dann auch bearbeitet werden, die im Bild als "stufig" wahrgenommen werden.

Die Bearbeitung kann in einem linearen Durchlauf durch das Bild geschehen, so daß das Verfahren gut für eine Hardware-Implementierung geeignet ist. Der Speicheraufwand ist in der Regel auf dem Chip realisierbar; beim Triple-Buffer-Betrieb wird lediglich ein weiterer Buffer benötigt, in dem das antialiaste Bild gespeichert wird.

Die Kantenerkennung auf dem gerenderten Bild kann mit Standard-Verfahren der Kantenerkennung durchgeführt werden. Aus der Kanteninformation in einer Umgebung können dann die realen Kanten approximiert werden, die als Grundlage für die Zumischung der benachbarten Pixelfarben dienen.

Um nicht das komplette Kantenbild abspeichern zu müssen, wird bevorzugt zu der Kantenerkennung im Versatz um einige Bildschirmzeilen der Prozeß der Verfolgung der Stufen durchgeführt. Sobald eine Kante erkannt wurde, kann unverzüglich für das aktuelle Pixel eine antialiaste Farbe berechnet werden.

Die Einbeziehung einiger Bildschirmzeilen bei der Verfolgung der Kanten reicht somit vollkommen aus, um eine deutliche Qualitätsverbesserung der Bilder zu erreichen. Wieviele Zeilen einbezogen werden sollen, kann nach gewünschter Bildqualität und zur Verfügung stehenden Platz auf dem Chip bestimmt werden.

Der Algorithmus läßt sich also in drei Teile unterteilen, die einzeln optimierbar sind. Die Optimierungsergebnisse werden an die jeweils nächste Stufe weitergereicht.

1. Kantendetektion im ursprünglichen Bild: Hierbei ist wesentlich, daß die Sprünge zwischen zwei benachbarten horizontalen (vertikalen) Stufen eindeutig bestimmt werden können, da nur sie als Informationsquelle der ursprünglichen rasterisierten Kante zur Verfügung stehen.
2. Bestimmung der angenommenen Lage der realen Kante anhand des Kantenbildes.
3. Bestimmung der Flächenanteile und daraus resultierend die Zumischung der geeigneten benachbarten Pixelfarben bei den Kantenpixeln.

Der Verfahrensschritt 1 erfolgt in einem eigenem Durchlauf durch das Bild, da für den folgenden Verfahrensschritt das Kantenbild in der Umgebung schon bekannt sein muß. Die Approximation der realen Geraden und das anschließende Mischen der Farben kann hingegen in einem Durchlauf geschehen, da nur aufgrund der Lage der Geraden in diesem Punkt die Mischung erfolgt.

Für eine Hardware-Realisierung ist es dagegen so, daß bereits beim ersten Durchlauf das komplette Bild einmal aus dem Speicher ausgelesen werden muß, woraufhin dann das Kantenbild (mindestens 1 Bit pro Pixel) im Speicher abgelegt wird. Beim zweiten Durchlauf werden dann die Kanten in voller Länge im Kantenbild verfolgt, was bei einer beliebigen Richtung der Kante einen (fast) zufälligen Zugriff auf den Speicher zur Folge hat. Es ergeben sich also Probleme bei der Bearbeitungszeit, aufgrund der Notwendigkeit zweier getrennter Durchläufe, und des schwierigen Zugriffs auf den Speicher beim zweiten Durchlauf. Unschön ist natürlich auch, daß extra ein Speicherbereich zur Verfügung stehen muß, in dem das Kantenbild abgelegt werden kann, da es bei einer Größe von minimal 400 kByte (1 Bit bei einer Bildschirmauflösung von 2048 x 1536) schlecht im Chip gehalten werden kann.

Das erfindungsgemäße Verfahren bietet die Möglichkeit der Lösung dieser Probleme, indem die Kanten nur lokal verfolgt werden. Vorteilhaft ist es, die Kante nur innerhalb eines lokalen Fensters von  $n \times n$  Pixeln im Bild zu verfolgen. Nur in diesem Fenster muß die Kanteninformation bekannt sein, die Speicherung des kompletten Kantenbildes entfällt also.

Bisherige Verfahren arbeiteten immer während der Generierung der Szenen und erforderten damit einen hohen Speicheraufwand und/oder eine Menge Rechenzeit. Durch die Verlagerung konnte dieser Nachteil größtenteils beseitigt werden, wobei

Im Vergleich zu anderen Verfahren, die eine ähnliche Geschwindigkeit erlauben, hat das hier vorgestellte den Vorteil, daß sowohl Billboards als auch Spotkanten antialiasiert werden können. Supersampling, welches auch diese Fälle behandelt, hat einen viel höheren Aufwand, und ist derzeit nicht echtzeitfähig.

Beim Triple-Buffer-Betrieb lässt sich aber eine Methode des "slicings" anwenden. Dabei wird das zu bearbeitende Bild in  $s$  vertikale Streifen eingeteilt, die nacheinander mit dem normalen Verfahren bearbeitet werden. Durch dieses Vorgehen wird ein Bild der Breite  $w$  in  $s$  Streifen der Breite  $w/s$  zerlegt, wodurch sich der Speicherbedarf um den Faktor  $s$  reduziert.

Einige mögliche Detailoptimierungen um die Bildqualität zu steigern, wie auch die genaue Berechnung der Flächenanteile oder die optimierte Bestimmung der Mischfaktoren an den Ecken eines Objektes wird weiter unten im einzelnen beschrieben werden.

Da mit dem hier beschriebenen Antialiasing-Verfahren nicht jene Fälle behandelt werden können, für die im gepointsampelten Bild nicht genügend Informationen vorhanden sind, ist es weiterhin günstig, dieses Verfahren mit einem Anderen zu kombinieren. Ideal wäre ein Verfahren, welches ausschließlich Polygone (z.B. durch Supersampling oder Areasampling) behandelt, deren Breite bzw. Höhe unter zwei Pixel liegt, damit der zusätzliche Aufwand sich in Grenzen hält und die Echt-

Um die Kante auch lokal möglichst genau annähern zu können, wird pro Pixel ein zentriertes Fenster verwendet, d.h. bei der Bearbeitung jedes einzelnen Pixels einer Zeile wird immer wieder ein anderes Fenster mit Kanteninformation vorgesehen.

Wesentlich ist die Erkennung der Kanten, die wirklich bearbeitet werden müssen, da die Kantenerkennung alle Kanten im Bild liefert.

Andere vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen gekennzeichnet bzw. werden nachstehend zusammen mit der Beschreibung der bevorzugten Ausführung der Erfindung anhand der Figuren näher dargestellt. Es zeigen:



Durch das folgend beschriebene Verfahren entsteht zunächst ein Kantenbild mit 4 Bit Information pro Pixel, das letztlich vorzustellende Verfahren arbeitet aber auf

Vorab erfolgt eine Steigungsdiskrimination: Bei x-dominanten Kanten erfolgt eine Zumischung der Farbe des darüber- bzw. des darunterliegenden Pixels, da nur von ihnen sichergestellt ist, daß wenigstens einer auf der anderen Seite der gerade betrachteten Kante liegt (und damit eine andere Farbe hat). Der linke und der rechte Nachbar kann sich aufgrund des Pointsamplings immer noch auf der gleichen Seite der Kante befinden. Entsprechendes gilt für die y-dominanten Kanten, so daß die Feststellung, daß y-dominante Kanten genauso behandelt werden sollten wie x-dominante sich aufdrängt. Eine Möglichkeit, die Fälle gemeinsam zu behandeln, ergibt sich, indem der eine Fall auf den anderen zurückgeführt wird. Die Rückführung erfolgt pro zu behandelndem Kantenpixel, indem der aktuell betrachtete Ausschnitt aus dem Kantenbild an der Hauptdiagonalen gespiegelt wird. Dieser Vorgang ist in Figur 1 dargestellt. Pro Pixel stehen nun zwei Kantenbildausschnitte zur Verfügung, die weiterhin vollkommen identisch behandelt werden können. Der eine führt dabei zu den vertikalen und der andere zu den horizontalen Mischfaktoren. Jeder Kantenbildausschnitt besteht aus zwei Bit Informationen, da für die Verfolgung der x-dominanten Kanten nur die Information "positive bzw. negative horizontale" Kante (entsprechend für die Verfolgung der y-dominanten Kante nur die Information "positive bzw. negative vertikale" Kante) benötigt wird.

Ausgehend von dem aktuell zu betrachtenden Pixel wird nun aus den noch vorhandenen zwei Bit die richtige Information ausgeblendet. Ist das Zentralpixel als positiv markiert, so werden auch in der Umgebung nur positive Kantenpixel berücksichtigt, um wirklich nur die positive Kante zu verfolgen; entsprechend werden, falls das Zentralpixel als negativ markiert ist, nur negative Kantenpixel betrachtet. Somit entfällt beim Beispiel eines senkrecht stehenden Fahnenmastes die störende negative bzw. positive Kante und beide Fälle können korrekt behandelt werden, wie es in Figur 2 dargestellt ist. Hier wird die Behandlung zweier nebeneinanderliegender Kanten dargestellt, die nach Rückführung auf den horizontalen Fall durch Drehung als x-dominante Binärbilder weiterverarbeitet werden. Ist das Zentralpixel jedoch als positiv und negativ markiert, so liegt der Spezialfall vor, bei dem benachbarte Farben die gleiche Farbvektorklänge besitzen,

Von nun an wird also mit einem binären Kantenbildausschnitt weitergearbeitet, bei dem nur noch x-dominante Kanten markiert sind, d.h., der Winkel der zu erkennenden Geraden liegt zwischen  $-45^\circ$  und  $+45^\circ$ .

Die Geometriebeschreibung einer in einem Bild dargestellten Szene erfolgt fast ausschließlich auf Polygonbasis, da Polygone am einfachsten handhabbar sind. Weitere Darstellungsmöglichkeiten, wie B-Splines (Angabe nur von Stützstellen der Oberfläche), Voxelmodelle (Beschreibung des kompletten Volumens des Objektes), sowie CSG-Bäume (Aufbau des Objektes aus geometrischen Primitiva), finden kaum Anwendung, da aus ihnen abgeleitete Darstellungsverfahren für die Rasterisierung zu komplex sind, um sie in Hardware realisieren zu können.

Die Dreiecke, beschrieben durch die drei Eckpunkte und Parametern (z-Wert, Texturkoordinaten, Normalen, usw.) an diesen Punkten, werden in einem sogenannten "Scanliner" rasterisiert, und anschließend wird jedem Pixel aufgrund der interpolierten Parameter ein Farbwert zugewiesen, der dann im Framebuffer abgelegt wird, falls das Pixel nicht durch ein Pixel eines anderen Dreiecks verdeckt ist. Unser Interesse gilt nun genau diesem Scanliner, der entscheidet, welche Pixel gesetzt werden, und welche nicht.

Die Arbeitsweise eines Scanliners lässt dabei sich wie folgend beschreiben: Ausgehend vom unteren Eckpunkt des Dreiecks wird für jede Zeile der reale Anfangs- und Endpunkt bestimmt, alle Pixel die zwischen diesen beiden Punkten liegen, gehören demnach zum Dreieck und werden dargestellt. Die Entscheidung, welches Pixel das erste bzw. letzte darzustellende ist, wird aufgrund der Lage des Pixelmittelpunktes zur realen Kante getroffen. Liegt der Pixelmittelpunkt innerhalb des Anfangs- und Endpunktes dieser Zeile, so wird das Pixel gesetzt. Durch dieses

Ergibt sich im Bild eine Stufe, so ist bekannt, daß die reale Kante zwischen den beiden Pixelmittelpunkten der verschiedenfarbigen Pixel verlaufen muß. Dies ist in Figur 3 dargestellt. Werden mehrere Stufen bei diesem Vorgehen berücksichtigt, so wird immer genauer die reale Kante angenähert. Die Verfolgung von Stufen gestaltet sich in realen Bildern schwieriger als hier zunächst angenommen, da im Bildausschnitt meist nicht nur eine Kante enthalten ist, sondern auch sich kreuzende Kanten, Kanten, die ihre Steigung ändern, sowie Texturkanten und Rauschen.

Über das aktuelle Fenster des Kantenbildes wird der Einfachheit halber ein lokales Koordinatensystem gelegt, durch das alle Pixel von nun an beschrieben werden können. Das Zentralpixel erhält die Koordinate (0/0.5); 0.5 in der y-Koordinate deshalb, da der hier angenommene Differenzoperator immer das Pixel oberhalb des Farbsprunges markiert, bei  $y=0.0$  liegt demnach genau der Farbsprung. Ein derartiges Fenster ist in Figur 4 dargestellt.

1. Schräg oberhalb liegt ein weiteres Kantenpixel, d.h., es erfolgt ein Sprung nach oben (Dieser Fall wird weiterhin als UP bezeichnet.)
2. Schräg unterhalb liegt ein weiteres Kantenpixel, d.h., es erfolgt ein Sprung nach unten (Fall: DOWN)
3. In der nächsten Spalte existiert kein weiteres Kantenpixel; die Kante hört also hier vollkommen auf (wir befinden uns wahrscheinlich an einer Ecke des Objektes) (Fall: NO)

- Voraussetzung ist dabei die Anwendung eines Operators, der bei der Verfolgung der Kante einen Kantenstreifen mit der Breite nur eines Pixels liefert.

Falls an beiden Enden der Stufe entgegengesetzte Fälle auftreten (links UP / rechts DOWN oder links DOWN / rechts UP), kann nun bereits eine Gerade festgelegt werden. Die Endpunkte befinden sich bei  $x_{\text{Anf}} := x_A - 0.5$  und  $x_{\text{End}} := x_E + 0.5$  und die y-Koordinate ergibt sich bei einem Sprung nach oben zu 0.5, bei einem Sprung nach unten zu -0.5.

Am Beispiel einer schräg nach oben verlaufenden Kante soll verdeutlicht werden, warum die Gerade durch die beiden Punkte

$$(x_{\text{Anf}}, y_{\text{Anf}}) := (x_A - 0.5, -0.5) \text{ und} \\ (x_{\text{End}}, y_{\text{End}}) := (x_E + 0.5, 0.5)$$

gelegt wurde. Zu beachten ist dabei die Unterscheidung von  $x_A$  (letztes Pixel der Stufe) bzw.  $x_E$  und  $x_{\text{Anf}}$  (Punkt auf der angenommenen Geraden) bzw.  $x_{\text{End}}$ . Aufgrund des Musters im Kantenbild ist genau bekannt, wo sich der Sprung zwischen den beiden beteiligten Farben befindet. Dieser Zusammenhang ist aus Figur 6 ersichtlich, welche die Zuordnung der möglichen Verläufe der realen Geraden zu einer Kante wiedergibt (Links oben: Muster im Kantenbild, rechts oben: Farbzuzuordnung der Pixel mit angenommener Geraden), links unten: minimale und maximale Steigung, rechts unten: parallele Geraden. Irgendwo zwischen den horizontal andersfarbigen Pixeln muß also die reale Kante verlaufen.

Während in Figur 6 die möglichen Extremfälle der möglichen Geraden dargestellt sind, bildet die gewählte Gerade nun genau einen Mittelweg zwischen allen Extremen, so daß der Fehler zur realen Geraden, unabhängig davon, um welche es sich handelt, minimiert wird.

Bei der Behandlung des Falles NO, in dem kein weiteres Kantenpixel in der nächsten Spalte vorhanden ist, wird dem Endpunkt die y-Koordinate 0.0 zugewiesen, da aus dem Kantenbild nicht ersichtlich ist, warum kein weiteres Pixel existiert. Der Grund kann entweder sein, daß eine Ecke eines Objektes vorliegt (in diesem Fall erscheint die Ecke etwas abgerundet), oder aber der Schwellwert bei der Kantenbildgenerierung nicht klein genug angesetzt war (so daß die Kante beliebig weiterläuft, jedoch nicht mehr als solche erkannt wurde).

Im vierten Fall (HOR) muß eine Sonderbehandlung vorgesehen werden, da dieser nur aufgrund der Beschränkung des Algorithmus auf ein Fenster auftritt.

Der einfachste Ansatz ist, diesen Fall genau wie den vorherigen zu behandeln, dem entsprechenden Endpunkt also den y-Wert 0.0 zuzuweisen. Dies würde jedoch zu unrichtigen Ergebnissen führen, wie am Beispiel von Figur 7 ersichtlich ist. Für jedes Pixel wurde die Gerade eingezeichnet, die sich durch dieses Vorgehen ergibt. Bei der Verschiebung des Fensters wird die erzeugte Gerade immer flacher, bis sie auf einmal vollkommen horizontal wird, sobald der Sprung aus dem Fenster läuft.

Prinzipiell ist das auch wünschenswert, aber ergibt sich für das zu betrachtende Pixel fast immer der gleiche y-Wert, wodurch kein sinnvoller Verlauf interpoliert wird.

Stattdessen wird eine Gerade herangezogen, die für alle Pixel, die zumindest an einem Ende noch einen Sprung sehen, gleich ist. Ergab sich bei  $x_{\text{Anf}}$  ein Endpunkt, so wird der zweite bei  $x_{\text{end}} = x_{\text{anf}} + (n-1)/2$ , mit  $n$  der Fenstergröße (Figur 7b) festgelegt. Durch dieses Vorgehen ergeben sich bei sehr langen Stufen (Stufen, die nicht mehr komplett in das Fenster passen) Übergangsbereiche an den initialen Sprüngen, in denen ein Farbverlauf entsteht, und Bereiche, in denen die Farben erhalten bleiben. Dieser Zusammenhang ist in Figur 8 wiedergegeben. Je größer das Fenster gewählt wird, desto breiter wird der Übergangsbereich, was zur Folge hat, daß die reale Kante besser approximiert wird.

Desweiteren ist es möglich, daß an beiden Enden ein Sprung in die selbe Richtung erfolgt (DOWN/DOWN oder UP/UP). In diesem Fall geht eine schräg nach oben verlaufende Kante in eine schräg nach unten verlaufende (oder umgekehrt über), es wird also zusätzlich zu den beiden Endpunkten ein dritter Punkt benötigt, der bei  $X_{\text{mid}} = (x_{\text{end}} + x_{\text{anf}})/2, 0$  festgelegt wird. Der mittlere Punkt ließe sich genauer bestimmen, indem man die jeweils nächsten Stufen in beide Richtungen verfolgt, und aus deren beiden Endpunkten den Mittelpunkt extrapoliert. Dies erhöht die Qualität des Bildes und ist daher sinnvoll, falls man bereit ist, den Mehraufwand hierfür in Kauf zu nehmen. Dieser Fall ist in Figur 9 wiedergegeben und recht selten und die Ergebnisse mit dem hier angenommenen Punkt sehen recht annehmbar aus, so daß der zusätzliche Rechenaufwand mit Blick auf die Hardwarerealisierung vermieden wird.

Alle bekannten Spezialfälle werden auf die Grundfälle zurückgeführt, indem die Zustände an den Endpunkten ermittelt umgesetzt werden. Dies geht im einzelnen aus Tabelle 1-3 hervor, wo die bei unterschiedlichen Stufen zu verfolgenden Geradenverläufe jeweils dargestellt sind.

Am Ende einer Stufe kann es vorkommen, daß sowohl ein Sprung nach oben als auch ein Sprung nach unten angezeigt wird, was durch das Zusammenlaufen zweier Kanten entsteht. Dieser Fall ist in Figur 10 wiedergegeben. Dabei ist im linken Teil der Figur das Kantenbild und im rechten Teil die Ausgangssituation dargestellt, welche zu dem links dargestellten Bild führte. Als beste Lösung für diesen Fall stellte sich die Betrachtung des entgegengesetzten Status heraus. Ist der

entgegengesetzte Status UP, so wird der aktuelle auf DOWN gesetzt, wodurch die Hauptkante weiter interpoliert wird. Entsprechend ergibt sich bei DOWN ein UP für den aktuellen Status. Nur falls der andere Status keine Vorzugsrichtung vorgibt (NO, HOR oder ebenfalls UP/DOWN), wird der Status auf NO gesetzt, und so auf eine Interpolation an diesem Ende verzichtet.

Texturkanten werden dadurch kenntlich, daß zwischen den Stufen ein Bereich existiert, in dem zwei Pixel im Kantenbild übereinander gesetzt sind. (Figur 11b) Texturkanten werden nicht weiter behandelt, da im Binärbild keinerlei Information über den wirklichen Farbverlauf an der Kante vorhanden ist; das Ergebnis einer neuerlichen Interpolation würde also immer eine Verschlechterung des Aussehens zur Folge haben. Es kann aber auch andere Gründe geben, daß zwischen zwei Stufen Pixel übereinander gesetzt sind, beispielsweise auch bei dem schon behandelten Fall zweier auf einen Punkt zulaufenden Kanten. Dieser Fall ist in Figur 11c wiedergegeben. In Figur 11 sind allgemein die Fälle wiedergegeben, welche zu "zwei übereinandergesetzten Pixeln" im Kantenbild führen. In diesen Fall muß trotzdem eine Behandlung erfolgen. Durch das Umsetzen des Status auf NO an dem Ende, wo der Übergangsbereich existiert, lassen sich beide Fälle sinnvoll behandeln. Bei einer Texturkante werden so beide Stati auf NO korrigiert, bei dem Fall zweier Kanten, wird nur der eine Status umgesetzt, durch den anderen erfolgt dann weiterhin eine Interpolation.

Problematisch erweist sich der Fall, bei dem zwischen den beiden Grundfarben gar kein Farbverlauf interpoliert wurde (wie es bei einem Testbild Ziff Davis' Winbench vorkommt). Das Kantenbild ist in keiner Weise von dem einer Texturkante unterscheidbar, und wird deswegen auch nicht behandelt. Dieser Fall ist in Figur 10e wiedergegeben.

Rauschen äußert sich im Kantenbild durch das vereinzelte Auftreten von Kantenpixeln, die in keinem Zusammenhang mit einer wirklichen Kante stehen. Dieser Fall findet in den Tabelle 1 bis 3 insoweit Berücksichtigung, indem, falls beide Stati NO sind, der y-Wert auf Null gesetzt und somit nicht weiter behandelt wird.

Am Beispiel einer schräg nach oben verlaufenden Kante soll noch einmal verdeutlicht werden, welche Unterschiede sich zwischen der angenommenen Geraden, und der realen Geraden maximal ergeben können.

Der Einfachheit halber wird für die Betrachtung ein anderes Koordinatensystem zugrunde gelegt, bei dem der Nullpunkt im Pixel links von der Stufe liegt. Dies ist



aus Figur 12 ersichtlich.

Die reale Gerade verläuft also sicher zwischen den Koordinaten (0,0) und (1,0) bzw.  $(x_{E,1})$  und  $(x_{E+1,1})$ , da sich sonst eine andere Rasterisierung ergeben hätte. Die angenommene Gerade  $g$  verläuft durch die Punkte (0.5,0) und  $(x_E + 0.5,1)$ , woraus sich die Geradengleichung ergibt zu

$$g: y = \frac{1}{x_E} * (x - \frac{1}{2})$$

Wesentlich ist die maximale Differenz dieser Geraden zu allen anderen Möglichen. Die Differenz wird nur an den ganzzahligen x-Koordinaten benötigt, da nur dort Samplepoints liegen. Es müssen also die Differenzen zu allen möglichen Extremfällen der realen Geraden betrachtet werden.

Es ergeben sich drei Fälle (siehe Figur 6)

#### 1. Differenz zu allen parallelen Geraden

Falls die reale Gerade parallel zur Angenommen verläuft, so ist die Differenz für jedes Pixel der Stufe die selbe. Aus der Geradengleichung für die am weitesten unten möglichen Geraden (Punkte (1,0) und  $(x_{E+1,1})$ )

$$g_u: y = \frac{1}{x_E} * (x - 1)$$

ergibt sich

$$\Delta y_1 = |g - g_u| = \frac{1}{2 * x_E}$$

als Differenz bei jedem x-Wert.

Aus der Geradengleichung für die am weitesten oben liegenden Geraden (Punkte (0,0) und  $(x_{E,1})$ )

$$g_0: y = \frac{1}{x_E} * x$$

ergibt sich

$$\Delta y_2 = |g_0 - g| = \frac{1}{2 * x_E}$$

als Differenz bei jedem x-Wert.

## 2. Differenz zur Geraden mit maximaler Steigung

Die Gerade mit der maximalen Steigung verläuft durch die Punkte (1,0) und  $(x_E, 1)$  und wird beschrieben durch:

$$g_M: y = \frac{1}{x_E - 1} * (x - 1)$$

$$\Delta y_3(x) = |g_M - g| = \left| \frac{1}{(x_E - 1) * x_E} * \left( x - \frac{1}{2} * x_E - \frac{1}{2} \right) \right|$$

Die maximale Differenz wird sich am weitesten außen ergeben, da dort die Geraden immer weiter auseinanderlaufen, es werden also die x-Werte  $1(\Delta y_3(1) = 1/2 x_E)$  und  $x_E(\Delta y_3(x_E) = 1/2 x_E)$  in die Gleichung 10 eingesetzt, wodurch sich die maximale Differenz

$$\Delta y_3 = \frac{1}{2 * x_E}$$

ergibt.

## 3. Differenz zur Geraden minimaler Steigung

Die Gerade mit der minimalen Steigung verläuft durch die Punkte (0,0) und  $(x_E + 1, 1)$  und die Geradengleichung lautet demzufolge:

$$g_m: y = \frac{1}{x_E + 1} * x$$

$$\Delta y_4(x) = |g_m - g| = \left| \frac{1}{(x_E + 1) * x_E} * \left( -x * \frac{1}{2} * x_E + \frac{1}{2} \right) \right|$$

Nach den gleichen Überlegungen wie bei Punkt 2 ergeben sich die maximalen Differenzen bei 1 () und  $x_E$  (), wodurch die maximale Differenz

$$1 \quad (\Delta y_4(1) = \frac{(x_E - 1)}{2 * (x_E + 1) * x_E} \quad \text{und} \quad x_E \quad (\Delta y_4(x_E) = \frac{(x_E - 1)}{2 * (x_E + 1) * x_E})$$

entsteht.

Wie aus den obigen Gleichungen ersichtlich ist, beträgt die maximale Differenz zu den Geraden  $\Delta y = x/2x_E$  Figur 13 gibt die maximale Abweichung in Abhängigkeit von der Stufenlänge  $x_E$ . Für lange Stufen entspricht die angenommene Gerade praktisch der wirklichen, wohingegen für kurze Stufen ( $x_E < 4$ ) kaum annehmbare Differenzen entstehen, wenn man vom Grenzfall einer Kante zwischen weiß und schwarz ausgeht.

Eine Verbesserung ergibt sich, wenn statt nur über eine Stufe die Kante über mehrere Stufen verfolgt wird, da dadurch die reale Gerade besser approximiert werden kann. Bei einer fest vorgegebenen Fenstergröße kann bei kurzen Stufen eine Interpolation über viele Stufen erfolgen, bei langen Stufen meist nur eine Stufe interpoliert werden, was der Form der Differenz-Funktion entgegenkommt. Bei sehr langen Stufen, die nicht mehr komplett in das aktuelle Fenster hineinpassen, wird nicht mehr versucht, der realen Geraden zu folgen, da dazu lokal die Information fehlt, so daß ab einer Stufenlänge, die über die Fensterbreite hinausgeht, jede Stufe die gleiche Interpolation erfährt (Figur 8). Das Fenster sollte also möglichst groß gewählt werden, um diesen Effekt zu vermeiden; bei einem Fenster der Größe des eigentlichen Bildes tritt dieser Fehler gar nicht mehr auf. Zu große Fenstergrößen widersprechen aber der eigentlichen Idee des Algorithmus, so daß ein Kompromiß zwischen den beiden Extremen gefunden werden muß.

Bei der Verfolgung nur einer Stufe tritt wie gezeigt das Problem auf, daß kurze Stufen zu einer sehr ungenau approximierten Geraden führen. Dies wird besonders augenfällig, wenn die Rasterisierung einer Kante nahe  $45^\circ$  betrachtet wird, bei der abwechselnd "ein-pixel-lange" und "zwei-pixel-lange" Stufen auftreten (Figur 14). Bei den "ein-pixel-langen" Stufen wird eine Gerade der Steigung  $45^\circ$  angelegt, bei den "zwei-pixel-langen" Sprüngen jedoch eine Gerade mit der Steigung

$$\arctan \frac{1 \text{ (Stufen in y-Richtung)}}{2 \text{ (Stufen in x-Richtung)}} \approx 26,6 \text{ Grad}$$

Durch die Verfolgung mehrerer Stufen kann die Vielfalt der möglichen Geraden (Steigung zwischen  $26,6$  und  $45^\circ$ ) auf einen kleinen Bereich eingeschränkt werden,

Mehrere Stufen werden jedoch nicht immer verfolgt, sondern nur dann, wenn die Stati an den Enden der zentralen Stufe (Stufe, zu der das aktuell betrachtete Pixel gehört) entgegengesetzte Richtungen der Sprünge anzeigen (also UP/DOWN oder DOWN/UP), da es sich nur in diesen Fällen um eine "gutartige" Kante handelt, die einer genaueren Approximation wert ist.

Bei einem Endstatus HOR handelt es sich auf jeden Fall um eine sehr flache Kante. Da nicht einmal die zentrale Stufe ins aktuelle Fenster paßt, wird garantiert auch keine andere Stufe komplett sichtbar sein.

Erfolgte ein Sprung nach oben, wird eine Zeile höher versucht, wieder eine möglichst lange Stufe zu finden; entsprechend wird bei einem Sprung nach unten eine Zeile tiefer verfahren. Am Ende der Stufe wird dann wiederum der Status festgestellt, und sofern der Status der selbe wie am Ende der zentralen Stufe ist, wird versucht, nun die nächste Stufe zu verfolgen. Von weiterem Interesse sind nur solche Stufen, die noch vollständig ins Fenster passen. Als Ergebnis erhält man eine Anzahl von Stufen mitsamt ihren jeweiligen Längen. Das Verfahren sieht auf den ersten Blick recht aufwendig aus, es muß jedoch jede Spalte des Kantenfensters nur ein einziges Mal betrachtet werden.

Der einfachste Ansatz wäre jetzt, die jeweiligen Endpunkte der letzten Stufen als Punkte auf der approximierten Geraden festzulegen, jedoch liefert das in einigen

Bei der Rasterisierung durch die Scankonvertierung entstehen an einer Kante charakteristische Sprungmuster, die eingehalten werden müssen. Ist für einen Sprung eine der Regeln nicht mehr gültig, so kann man davon ausgehen, daß dieser Sprung zu einer anderen Kante gehört, somit kann die entsprechende Stufe eliminiert werden.

1. Es können maximal zwei verschiedene Stufenlängen vorkommen, deren Stufenlängen sich außerdem um maximal 1 unterscheiden dürfen.
2. Nur eine der beiden Stufenlängen darf mehrmals hintereinander auftreten.
3. Durch das Aneinanderreihen der Anzahlen der Stufen, die die gleiche Länge haben, erhält man eine Zahlensequenz, bei der abwechselnd immer eine Eins und dann eine beliebige Zahl ( $> 0$ ) steht. Die Einsen (nur die an jeder zweiten Position) werden aus dieser Sequenz gestrichen. Bei der erhaltenen Sequenz dürfen wieder nur zwei verschiedene Zahlen vorkommen, die sich um eins unterscheiden.
4. Bei der unter 3. erhaltenen Sequenz darf nur eine der beiden möglichen Zahlen mehrmals hintereinander auftreten.
5. Durch wiederholtes Anwenden der Regeln 3. und 4. auf die Zahlensequenz, läßt sich ein immer globalerer Blick auf die Kante gewinnen.

Je kleiner das betrachtete Fenster gewählt wird, desto weniger der oben genannten Regeln müssen beachtet werden, da in einem kleines Fenster nur sehr wenige Stufen passen, und somit nicht genügend Information für alle Regeln zur Verfügung

steht. Bei der hier als Beispiel beschriebenen Hardware-Implementierung wurde eine Fenstergröße von  $17 \times 17$  gewählt, bei der nur die ersten beiden Regeln implementiert wurden, da die dritte Regel nur in sehr wenigen Fällen Anwendung finden würde, und die Unterschiede so marginal sind, daß der Mehraufwand nicht gerechtfertigt ist. Bei der nachfolgend beschriebenen Software-Implementierung, die für beliebige Fenstergrößen ausgelegt ist, wurden die Regeln bis einschließlich Nr. 4 berücksichtigt.

Ausgehend von der zentralen Stufe werden sukzessive jeweils immer eine Stufe nach rechts bzw. links zu den betrachteten Stufen hinzugefügt. Ist für eine der zugefügten Stufen eine Regel nicht mehr erfüllt, so wird die Stufe wieder entfernt, und es wird nur noch in die andere Richtung weitergesucht. Können auf beiden Seiten keine weiteren Stufen hinzugenommen werden (ohne die Regeln zu verletzen), so ist dieser Vorgang abgeschlossen, und es können aus den Stufen die Endpunkte der anzulegenden Geraden bestimmt werden.

Falls die letzten Stufen an beiden Enden komplett benutzt werden, ergibt sich das Problem, daß es bei der Verschiebung des Fensters um ein Pixel vorkommen kann, daß am linken Rand eine Stufe nicht mehr ins Fenster paßt, und gleichzeitig eine neue Stufe am rechten Rand dazugenommen wird, was in einer relativ starken Änderung der angenommenen Geraden resultiert.

In Figur 18 ist wiedergegeben, wie die Verschiebung des Fensters um ein Pixel nach rechts zu einer neuen und einer wegfallenden Stufe führt.

Dieser Effekt kann vermieden werden, wenn die letzten Stufen nur halb benutzt werden, das heißt es wird die halbe Länge zur x-Koordinate und 0.5 zur y-Koordinate hinzugerechnet. Durch dieses Vorgehen wird die abrupte Hinzunahme bzw. das abrupte Weglassen einer Stufe verdeckt, und die Geraden benachbarter Pixel passen sich besser einander an (Figur 19).

Das Verfahren arbeitet wie vorgestellt auf einem gepointsamplen Bild, die endgültige Farbgebung eines Pixels ergibt sich also aus seiner gepointsamplen Farbe unter Zumischung der Farben benachbarter Pixel. Die Zumischung der Farben wird jedoch nicht in jedem Fall durchgeführt. Handelt es sich bei betrachteten Pixel um kein Kantenpixel, das heißt es wurden keine extremen Farbsprünge zu den benachbarten Farben wahrgenommen, so wird der ursprüngliche Farbwert übernommen, was bei ca. 90% der Pixel eines Bildes auftritt. In den meisten

Die Bestimmung der einzelnen Mischfaktoren erfolgt auf der Grundlage der pro Pixel angelegten Gerade(n), die durch die wahrnehmbaren Farbsprünge im Bild bestimmt werden. Die Zumischungsrichtung ergibt sich aus der Lage des Pixels bezüglich des Farbsprunges. Wurde beispielsweise ein Farbsprung zum darüberliegenden Pixel erkannt, so wird daraus ein Mischfaktor bzgl. dieses Pixels bestimmt.

1. Ist das darüberliegende Pixel im Kantenbild als horizontal markiert, so ergab sich ein Farbsprung zum aktuellen Pixel und es wird durch dieses Pixel eine Gerade bestimmt, die den UP-Mischfaktor festlegt.
2. Ist das aktuelle Pixel im Kantenbild als horizontal markiert, so ergab sich ein Farbsprung zum darunterliegenden Pixel und es wird eine Gerade bestimmt, die den DOWN-Mischfaktor festlegt.
3. Ist das linke Pixel als vertikal im Kantenbild markiert, so ergab sich ein Farbsprung zum aktuellen Pixel und es wird eine Gerade unter Rückführung auf den horizontalen Fall bestimmt, die den LEFT-Mischfaktor festlegt.
4. Ist das aktuelle Pixel als vertikal markiert, so ergab sich ein Farbsprung zum rechten Nachbarn und es wird eine Gerade unter Rückführung auf den horizontalen Fall bestimmt, die den RIGHT-Mischfaktor festlegt.

Bei den Punkten 1 und 3 fällt auf, daß das aktuelle Pixel gar nicht als Kantenpixel markiert worden war. Das kam daher, daß der Differenzoperator immer nur Pixel markiert, die entweder links (für den vertikalen Operator) oder oberhalb (für den horizontalen Operator) des Farbsprunges liegen. In diesen beiden Fällen muß das aktuelle Fenster also um ein Pixel nach oben (im Fall 1) bzw. um ein Pixel nach links (im Fall 3) verschoben werden, damit das nachfolgend vorgestellte Verfahren angewendet werden kann, da dort davon ausgegangen wird, daß das Zentralpixel ein Kantenpixel enthält, von dem aus die Gerade verfolgt werden soll.

Das Koordinatensystem, in dem der Anfangs- und Endpunkt der Geraden festgelegt wird, wurde so definiert, daß die x-Koordinate des betrachteten Punktes Null ist und der Farbsprung sich genau bei der y-Koordinate Null befindet

Die Gerade wurde definiert durch die beiden Punkte  $(x_{Anf}, y_{Anf})$  und  $(x_{End}, y_{End})$ , somit lautet die allgemeine Geradengleichung:

$$y = \frac{y_{End} - y_{Anf}}{x_{End} - x_{Anf}} * (x - x_{Anf}) + y_{Anf}$$

Um den Mischfaktor aus dieser Geraden zu extrahieren, gibt es prinzipiell zwei verschiedene Verfahren.

Durch Einsetzen des x-Wertes 0 erhält man den Schnittpunkt der Geraden mit der y-Achse:

$$y_{Real} = - \frac{y_{End} - y_{Anf}}{x_{End} - x_{Anf}} * x_{Anf} + y_{Anf}$$

Ist der y-Wert größer als 0.0, jedoch kleiner als 1.0, so muß das Pixel an der Koordinate (0/0.5) eine Zumischung aus dem darunterliegenden Pixel erfahren. Ist der y-Wert kleiner als 0.0, jedoch größer als -1.0, so wird das Pixel an der Koordinate (0/-0.5) mit dem darüber liegenden Farbwert abgemischt. Der Betrag des y-Wertes gibt dabei an, wieviel zugemischt werden soll. Aus der Betrachtung zweier Spezialfälle soll klar werden, warum dies so festgelegt wurde. Ist der y-Wert genau Null, so verläuft die Gerade genau zwischen den beiden Pixeln, jedes Pixel gehört also voll zu der jeweiligen Farbseite. Ist der y-Wert jedoch fast 0.5, so gehört das obere Pixel nur zu 50% zur oberen Farbhälfte, hat jedoch vollkommen die Farbe der oberen Farbhälfte, da das Bild ja Ergebnis eines Pointsampling-Verfahrens war. Der y-Wert markiert nun, wo der eigentliche Farbsprung hätte stattfinden sollen, falls vertikal eine größere Auflösung gewählt worden wäre. Durch die Mischung erhält das Pixel nun eine Farbe aufgrund der Flächenanteile zwischen den beiden Extremfarben.

Liegt der Betrag des y-Wertes zwischen 0.5 und 1.0, so sollte aufgrund der Geraden das Pixel bereits den anderen Farbwert haben, nach dem Kantenbild hat es ihn jedoch nicht. Dies kann dadurch zustande kommen, daß die angenommene Gerade nicht exakt der wirklichen Kante entspricht. Es werden jedoch trotzdem Faktoren bis 1.0 zugelassen, da benachbarte Pixel ebenfalls nach der vermeintlich



$$\text{mix}_{\text{center}} = 1 - \text{mix}_{\text{up}} - \text{mix}_{\text{down}} - \text{mix}_{\text{left}} - \text{mix}_{\text{right}}$$

Die beiden gegenüberliegenden Mischfaktoren (UP/DOWN bzw. LEFT/RIGHT) ergeben zusammengezählt maximal 1.0, so daß auch der zentrale Mischfaktor im Bereich 0.0 bis 1.0 liegt. Sind jedoch vertikale und horizontale Mischfaktoren vorhanden, so ist dies nicht mehr gewährleistet. Das Problem entsteht daraus, daß sich die Faktoren in diesem Falle nicht mehr komplementär verhalten. Figur 23 enthält eine Ecke eines Objektes, an dem dies verdeutlicht werden soll. Die vertikale Kante gibt an, daß ein bestimmter Prozentsatz von linken Pixel zugemischt werden soll, gleiches gilt für die horizontale Kante bzgl. des unteren Pixels. Die beiden Flächen, die zu den Mischfaktoren führen, besitzen jedoch eine gemeinsame Fläche, die gedanklich getrennt werden müßte, und jedem Faktor nur ein Teil dieser Fläche zugeschlagen wird.

Diese genauere Betrachtung macht aber nur Sinn, wenn die Mischfaktoren sich auch auf die wirklichen Flächenanteile beziehen. Da bei dem implementierten Verfahren dies nicht verwirklicht ist, wird hier erneut eine Näherung eingeführt, indem bei vertikalen und horizontalen Mischfaktoren alle Faktoren halbiert werden.

$$mix_{center} = 1 - \frac{mix_{up}}{2} - \frac{mix_{down}}{2} - \frac{mix_{left}}{2} - \frac{mix_{right}}{2}$$

Durch dieses Vorgehen ist wieder gewährleistet, daß der zentrale Mischfaktor im Bereich 0.0 bis 1.0 liegt. Die verwendete Näherung ist sehr grob, die Fehler werden im Bild jedoch nicht wahrgenommen, da die Ecke eines Objektes eine Diskontinuität darstellt, und dadurch der entstehende Farbfehler nicht auffällt.

Für die Farbmischung muß zwischen zwei oder mehr Farben interpoliert werden, um eine Zwischenfarbe zu erhalten. Diese Interpolation kann in einem beliebigem Farbraum durchgeführt werden (da alle in einander überführbar sind), wobei sich die Ergebnisse mehr oder weniger stark unterscheiden. Die Unterschiede in den Farben zwischen dem RGB- und dem YIQ-Modell sind mit bloßem Auge nicht wahrnehmbar. Da die Farben initial als RGB-Farben vorliegen und auch final wieder als solche benötigt werden, wird auf eine Umrechnung in ein anderes Farbmodell verzichtet, und die Interpolation wird im RGB-Farbraum vollzogen.

Die Farbmischung eines Pixels erfolgt letztlich pro Farbkanal nach der Mischungsformel:

$$col_{center}^{new} = mix_{center} * col_{center}^{old} + mix_{up} * col_{up}$$

Wobei auf der rechten Seite der Gleichung die Farben (col?) aus dem Originalbild stammen.

Da das Verfahren nur auf Informationen aus fertig gerenderten Bildern, die im Framebuffer stehen, zurückgreift, wurde eine Implementation als Stand-Alone-Programm vorgezogen, d.h., das Programm wird von der Kommandozeile mit einem Bild in beliebigen Format (TIFF, PPM, BMP usw.) aufgerufen, und schreibt ein antialiastes Bild heraus; ein direkter Anschluß an den Renderingprozeß ist also nicht nötig. So kann das Ergebnis des Verfahrens mit verschiedenen Renderern ausprobiert werden, die auch nicht als Software zur Verfügung stehen müssen, sondern von denen nur Bilder vorliegen. Ebenso ist es möglich, Kombinationen mit anderen Antialiasing-Verfahren zu testen, die schon im Rendering-Prozeß eingebaut sind, da mit dem hier vorliegenden Algorithmus nicht alle Aliasing-Effekte behoben werden können.

Es wurde viel Wert darauf gelegt, möglichst viele Fälle auf einen Grundfall zurückzuführen, wie beispielsweise die Verfolgung der vertikalen auf die Verfolgung der horizontalen Kanten, oder das Suchen der Stufen nach links auf das Suchen nach rechts. Durch dieses Vorgehen können Änderungen schnell umgesetzt werden, da sich immer nur der jeweilige Grundfall ändert, nicht aber die Rückführung, die einmalig implementiert werden mußte.

Die Fenstergröße ist variabel gehalten und nicht ausschließlich auf quadratische Fenstergrößen mit einem zentrierten Zentralpixel beschränkt, sondern es ist möglich, für jede Richtung eine eigene Blicklänge zu definieren. So ist es beispielsweise denkbar, horizontal einen größeren Ausschnitt zu wählen, da die Kanteninformation für die Pixel chipintern gespeichert ist. Nach unten sollten bei Verwendung im Display-Prozeß möglichst wenige Zeilen benutzt werden, da all diese Zeilen gespeichert werden müssen (Erklärung bei der weiter unten beschriebenen Hardware-Implementierung).

Die Implementierung des Post-Antialiasing-Verfahrens erfolgte in der Programmier-

Der Pseudoalgorithmus für das Verfahren stellt sich wie folgt dar (dick geschriebene Variablen sind die jeweiligen Ergebniswerte):

```
PostAntialias(Image pic, Image result) {

    generateEdgePic(pic, edges);

    for y in 0..(pic.height-1) {

        for x in 0..(pic.width-1) {

            if isEdgePixel(x,y) {

                cutActualWindow(edges, edgeWindow);

                computeMixFactorsHorizontal(x, y, edgeWindow,

                                           mix_up, mix_down);

                transformVerticalToHorizontal(edgeWindow);

                computeMixFactorsHorizontal(x, y, edgeWindow,

                                           mix_left, mix_right);
            }
        }
    }
}
```



```
computeMixFactorsHorizontal(x, y, edgeWindow,
                             mix_up, mix_down) {
    if isEdge(x,y) {
        maskRightEdgeType(edgeWindow, binWindow);
        getPositionInEdge(binWindow, xAnf, yAnf,
                           statAnf, xEnd, yEnd, statEnd);
        mixFactor(xAnf, yAnf, statAnf, xEnd, yEnd,
                   statEnd, mix_down);
    } else {
        mix_down = 0;
    }
    if isEdge(x,y-1) {
        translateWindow(edgeWindow);
        maskRightEdgeType(edgeWindow, binWindow);
        getPositionInEdge(binWindow, xAnf, yAnf,
                           statAnf, xEnd, yEnd, statEnd);
        mixFactor(xAnf, yAnf, statAnf, xEnd, yEnd,
                   statEnd, mix_up);
    }
}
```



Für die Hardware-Implementierung wurden folgende Parameter und Grenzwerte gewählt:

- Ist die Fenstergröße zu klein gewählt (etwa 9 x 9), so läßt die Bildqualität bei flachen Kanten zu wünschen übrig, da die Übergangsbereiche sehr kurz werden (nur 8 Pixel / vergleiche dazu Figur 8). Ist das Fenster jedoch zu groß gewählt, so steigt die Komplexität einiger Module, und damit auch die Gatteranzahl, sehr stark an. Für die Implementation wurde also eine mittlere Fenstergröße gewählt, um einen Kompromiß zwischen diesen beiden Extremen zu finden.

- Die maximale Bildschirmbreite wurde mit 2048 Pixel pro Zeile angenommen. Dies stellt sicherlich eine obere Grenze für Bildschirmauflösungen der nächsten Jahre dar. Die maximale Bildschirmhöhe ist ebenfalls mit 2048 Zeilen festgelegt. Da das Verhältnis von Breite zu Höhe im Regelfall fest vorgegeben ist (1,25 oder 1,33), so wird dieser Maximalwert sicherlich nie erreicht werden. Die Festlegung der maximalen Bildschirmbreite führte zum Festlegen der Adreßbreiten der Zähler auf 11 Bit und der maximalen Länge der verwendeten Pipes auf 2048 Elemente.

- Dieser Wert ergab sich aus der Fehlerbetrachtung der maximalen Abweichungen der Mischfaktoren vom tatsächlichen Wert. (Die maximale Abweichung beträgt maximal  $1/256$  des Original-Mischfaktors. Aufgrund der Form der Mischungsformel ergibt sich somit eine maximale Abweichung um 5 Farbwerte.)

Aus der Festlegung der Mischfaktorbreite ergab sich auch die nötige Genauigkeit der Dividierer, die mit einer Bitbreite von 9 Bit angenommen wurden.



Das erfindungsgemäße Verfahren kann sowohl als Triple-Buffer als auch als zwischengeschaltetes Modul im Display-Prozeß Anwendung finden (Erklärung der beiden Konfigurationsmöglichkeiten in einem späteren Abschnitt). Der Entwurf mittels eines Triple-Buffers erfordert einen recht komplexen RAM-Controller, der die entsprechend nötigen Farbwerte aus dem Speicher (SDRAM oder einer anderen Speicherart) holt, und die gemischten Werte wieder zurückschreibt. Der Entwurf dieses Controllers würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen, weswegen auf diese Variante verzichtet wurde. Das Grundsystem wurde also für den Display-Prozeß entworfen. Mittels kleiner Änderungen läßt sich das System für einen Triple-Buffer-Betrieb umrüsten, wie er weiter unten näher beschrieben ist.

Das System ist nach dem Pipelining-Prinzip aufgebaut, d.h., es wird in jedem Takt ein fertiggemischtes Pixel geliefert. Um dies zu bewerkstelligen, befinden sich immer mehrere Pixel gleichzeitig in der Verarbeitung, da es nicht möglich ist, alle nötigen Bearbeitungsschritte in einem Takt (in unserem Fall 15 ns) durchzuführen. Das System funktioniert so, daß mit jedem Takt ein neuer Farbwert eines Pixels übernommen und eine feste Anzahl Takte später der gemischte Farbwert dieses Pixels als Ausgangswert bereitgestellt wird. Die einzelnen Registerstufen wurden an die Stellen so eingefügt, daß die maximale Bearbeitungszeit in einem Takt nicht überschritten wird. Als Taktrate wurde ein 66 MHz-Takt gewählt; die Periodendauer beträgt somit 15 ns. Ferner wurde eine 0,35  $\mu$ m CMOS-Technik angenommen, da für diesen Fall die Verzögerungszeiten der einzelnen Elemente aus dem Entwurf eines anderen Systems (Visa<sup>+</sup>-System von GMD FIRST) in etwa bekannt waren. Wird das System für eine andere Taktrate oder Technologie vorgesehen, so verschieben sich natürlich die Registerstufen. Der Inhalt des Pipes in Abhängigkeit vom aktuellen Fenster ist in Figur 24 näher dargestellt.

Die einzelnen Module werden durch Blockschaltbilder illustriert, deren verwendete Symbolik in Figur 67 erklärt wird. Die Module werden hier gemäß Top-down-Methode präsentiert, das heißt, es wird zunächst das Hauptmodul beschrieben, dann die darin enthaltenen Module. Sollte ein Modul weitere Untermodule enthalten, so wird das entsprechende Untermodule gleich im Anschluß an das Modul beschrieben.

Das Antialias-System() gemäß Figur 24 sowie Tabelle 4 ist das Hauptmodul, von dem aus alle weiteren Module importiert werden und als Teilkomponenten weiter unten beschrieben sind.

Das vorliegende System besteht prinzipiell aus zwei entkoppelten Prozessen:

1. Generierung der Kanteninformation
2. Berechnung der Geraden aufgrund eines lokalen Ausschnittes aus dem Kantenbild und anschließende Mischung der Pixelfarben

Da die Mischung auf dem Kantenfenster arbeitet, muß der Kantengenerierungsprozeß immer einen Vorsprung von 8 Zeilen und 8 Punkten haben, so daß bei einem 17 x 17 Fenster schon alle Kanteninformationen zur Verfügung stehen, wenn sie benötigt werden.

Die Kanteninformation wird im Modul EdgeValueGenerator() (Tabelle 6, Figur 27) aus den neu eingelesenen Farbwerten erzeugt. Im Modul WindowSwitch() (Figur 31) wird der jeweils aktuelle Ausschnitt aus dem Kantenbild gehalten. Im Modul CenterPipe() werden die temporär nicht mehr benötigten Kanteninformationen zwischengespeichert. Pro Pixel werden 4 Bit Kanteninformation gehalten, wodurch sich bei 16 parallel abgelegten Pixeln eine Bitbreite von 64 Bit ergibt. Das wichtige bei diesem Modul ist, daß die Kanteninformation "on-chip" gespeichert wird, denn in jedem Takt werden 64 Bit abgelegt und auch parallel 64 Bit wieder eingelesen. Ein externer Speicher wäre also ständig damit beschäftigt, Werte abzulegen und wieder zu holen, und könnte somit für nichts Anderes verwendet werden. Die Speicherung ist praktisch auch möglich, da bei einer maximalen Bildschirmbreite von 2048 Pixeln 128 kB abgelegt werden müssen. (Derzeit sind on-chip RAMs von 1 MBit ohne größere Probleme realisierbar.) Dieser Speicher ist in beiden Varianten (Triple-Buffer / Display-Prozeß) nötig.

Für jedes einzelne Pixel müssen bis zu vier Geraden verfolgt werden, um die vier Mischfaktoren aus den einzelnen Richtungen zu bestimmen. Statistisch gesehen, wird in etwa 61% der Fälle nur eine Gerade benötigt. Jedoch kommen auch die anderen Fälle (zwei Geraden 27%, drei Geraden 8% und sogar vier Geraden 4%) vor. Da in jedem Takt ein neues Pixel bearbeitet wird, muß also der schlimmste Fall von vier Geraden angenommen werden und eine parallele Bearbeitung aller vier Fälle erfolgen. Dies geschieht in den Modulen ComputeEdge(), die als Ergebnis jeweils einen Mischfaktor für die entsprechende Gerade liefern. Für die vertikale Verfolgung der Geraden kann dabei das gleiche Modul wie für die horizontale Gerade verwendet werden, da, wie schon häufiger erwähnt, das vertikale Kantenfenster vorher zu einem horizontalen transformiert wird (geschieht in WindowSwitch()).

Im Modul EdgeDiffUnit() (Figur 28) findet die eigentliche Entscheidung statt, ob zwischen zwei Pixeln eine Kante existiert oder nicht. Zu diesem Zweck muß der euklidische Abstand  $a$  der beiden Farben im Farbraum bestimmt werden, auf den dann im nachhinein eine Schwellwertbildung angewendet wird. Der Schwellwert



Im Modul WindowSwitch() (Figur 31, Tabelle 10) ist der aktuelle Kantenbildausschnitt gespeichert, wobei die Bits schon so abgespeichert werden, daß vertikale Kanten horizontal verfolgt werden können. Über den Eingang EdgePipe\_out werden die schon generierten Kanteninformationen der rechten Spalte aus dem Speicher gelesen; über EdgeVal kommt der neu erzeugte Kantenwert hinzu. Entsprechend erfolgt über EdgePipe\_out die Ausgabe der für spätere Zeilen nötigen Kanteninformation. In der Pipe werden die Kantenwerte nicht pixelweise gespeichert, sondern vielmehr sortiert nach den Typen der Kantenwerte, so daß sich die Verteilung in Figur 32 ergibt.

Um die Verfolgung der Stufen in den einzelnen Fenstern durchführen zu können, wird die Kanteninformation zeilenweise benötigt. Da die Information aber spaltenweise neu ins Fenster übernommen wird, muß bei dem horizontalen Fenster eine Neuordnung der Bits stattfinden, damit sie in der richtigen Reihenfolge gespeichert werden. Bei dem vertikalen Fenster muß dies nicht geschehen. Dort findet nämlich eine Transformation von vertikal nach horizontal statt. Im Endeffekt wird die Wirkung der Transformation durch die Neuordnung der Bits rückgängig gemacht. In den Blockschaltbildern wurden die Parameter nicht durch konkrete Werte ersetzt, damit das Muster der Verkettung der Bits besser deutlich wird (w ist die Breite des Kantenfenster, also 17, und h ist die Höhe, auch 17).

Bei dem Modul pipe() (Figur 35, Tabelle 12) handelt es sich um ein schlichtes Verzögerungsmodul, das ein Datum übernimmt, und nach einer fest vorgegebenen Anzahl von Takten wieder ausgibt. In der Grundform wäre das Modul so zu implementieren, daß nacheinander so viele Register geschaltet werden, wie es die Länge verlangt. Dies ist jedoch aufgrund der beträchtlichen Hardware-Kosten (7 Gatter pro gespeichertes Bit) nicht sinnvoll, da zusätzlich noch die Länge variabel gehalten ist, gar nicht möglich. Es wird daher ein RAM vorgesehen, bei dem die Hardware-Kosten wesentlich günstiger (maximal 1 Gatter pro gespeichertes Bit) sind. Bei dem Entwurf der Pipe() wurde mit besonderer Sorgfalt vorgegangen, damit die Hardware-Kosten möglichst gering ausfallen, da die Pipes aufgrund ihrer enormen Größe die höchsten Kosten verursachen. In der normalen Form einer Pipe ist immer ein Dualport-RAM notwendig, da in jedem Takt ein Wert geschrieben und gleichzeitig ein Wert gelesen werden muß. Durch das parallele Ablegen zweier Werte im Speicher konnte der zweite Port eingespart werden, indem immer in einem Takt zwei Werte gleichzeitig an eine Adresse geschrieben werden und im nächsten Takt zwei Werte parallel ausgelesen werden (Figur 37).

In dem Modul MaskGenerator(), Figur 38, Tabelle 13 werden die beiden Masken generiert, mit denen das aktuelle Kantenfenster maskiert wird, um nur relevante Pixel aus der Umgebung zu betrachten. Die Notwendigkeit der y-Maske entsteht dadurch, daß bei der Bearbeitung der Pixel der ersten 8 Zeilen im oberen Bereich des Fensters noch Pixel enthalten sind, die gar nicht zum aktuellen Bild gehören. Um zu verhindern, daß unter Umständen über die Bildgrenze hinaus Geraden verfolgt werden, erfolgt eine Maskierung dieser Pixel. Entsprechendes gilt für die untersten 8 Zeilen des Bildes, bei denen in den unteren Zeilen keine legalen Kantenwerte vorhanden sind.

Das Kantenfenster wird, wie schon erwähnt, bei der Bearbeitung laufend um ein Pixel nach rechts weitergeschoben. Ist das letzte Pixel einer Bildzeile erreicht, so wird ein Sprung zum ersten Pixel der nächsten Zeile ausgeführt. Durch dieses Vorgehen entstehen bei den letzten acht Pixeln einer Zeile am rechten Rand des Fensters Pixel, die eigentlich schon zum linken Rand des Bildes gehören (vergl. Figur 39). Entsprechend sind im Fenster bei den ersten acht Pixeln einer Zeile noch Werte enthalten, die eigentlich zum rechten Rand des Bildes gehören. Um die jeweils für das aktuelle Fenster ungültigen Werte auszublenden, wird die x-Maske benötigt. Dadurch, daß im nicht maskierten Fenster sowohl Pixel vom rechten, als auch vom linken Rand des Bildes enthalten sein können, geht beim Umschalten in die nächste Zeile keine Zeit verloren, und es kann eine Behandlung wie im Normalfall stattfinden.

In dem Modul MaskCounter() (Figur 40, Tabelle 14) wird die Position des aktuell zu bearbeitenden Pixels bestimmt. Zu Beginn stehen die Zähler außerhalb des Bildes  $(x,y) = (-11,-9)$ , da über die ersten Takte zunächst einmal die Kanteninformation für die ersten Zeilen generiert werden muß; dementsprechend gibt das Signal solange ein Valid = 0 aus. Die Variablen x\_in und y\_in bestimmen, ob das neu im Kantenfenster sichtbar werdende Pixel zur Umgebung des aktuellen Pixels gehört. Das Signal EndOfLine wird jeweils am Ende einer Zeile aktiv, um das Toggeln der xmask im Modul MaskGenerator() zu ermöglichen.

Für die Verfolgung der Geraden stehen bisher zwei Kantenfenster zur Verfügung, von denen im Normalfall nur eines im Zentralpixel als Kante markiert ist. Durch die UND-Verknüpfung des gesamten Fensters mit diesem Zentralpixel wird das nicht benötigte Kantenfenster ausgeblendet. In einigen Fällen können jedoch auch beide Fenster erhalten bleiben, so daß die beiden Fenster pixelweise ODER-verknüpft werden.

Das Untermodul `CutNeededWindow()` hat damit keine eigenständige Funktionalität.

In `MaskNeededWindow()` erfolgt dann die eigentliche Maskierung des nun nicht mehr rechteckigen Fensters, bei dem die Pixel ausgeblendet werden, die nicht zur aktuellen Umgebung gehören.

Im Modul findEnd() wird die zentrale Stufe bis zu ihrem Ende verfolgt. Prinzipiell ist dies ein iterativer Prozeß, denn an jeder Stelle (ausgehend von der Mitte) erfolgt ein Vergleich, ob die Stufe schon beendet ist. Ist das der Fall, so wird der Status an dieser Stelle bestimmt, andernfalls erfolgt an der nächsten Stelle die gleiche Prozedur. Da dies jedoch (diskret aufgebaut) eine zu lange Zeit in Anspruch nehmen würde, wurde dieses Modul als einzelnes "Case" modelliert, bei dem die Abfrage parallel stattfindet. Durch eine automatische Logik-Optimierung mittels eines geeigneten Tools wurden so die Hardware-Kosten, und auch die Bearbeitungszeit reduziert.

Am Ende einer Stufe kann es vorkommen, daß sich sowohl nach oben, als auch nach unten eine weitere Stufe zur Verfolgung anbietet. Anhand des jeweils entgegengesetzten Status am Ende der Stufe wird die beste Möglichkeit ausgewählt. Bietet sich keine Stufe an, so wird der entsprechende Status auf NO korrigiert.



Da die letzten Stufen nicht mehr so lang sein können, wird deren Bitbreite auf zwei bzw. ein Bit reduziert. (Sie können nicht mehr so lang ausfallen, weil, wenn bei der fünften Stufe noch etwas eingetragen werden soll, die vorigen Stufen mindestens die Länge eins besessen haben müssen. Folglich kann die fünfte Stufe noch maximal die Länge drei haben, damit sie noch vollständig im Fenster liegt und erkannt wird.)

Da dieses Modul wieder zu komplex für einen diskreten Aufbau ist, wurde wieder auf die Möglichkeit der Modellierung mittels eines Case zurückgegriffen, und mittels einer Logik-Optimierung minimiert.

Im Modul `GetPossibleJumps` (Figur 48) werden die Längen der einzelnen Stufen mit der der zentralen Stufe verglichen, da sich nur eine Gerade ergeben kann, wenn alle

Stufenlängen innerhalb einer Toleranz von 1 liegen. Der Vergleich erfolgt über eine Subtraktion und anschließender Auswertung der Ergebnisse.

Zunächst wird anhand des ersten `SelectFirstOne()`-Moduls entschieden, ob um eine längere oder um eine kürzere Stufen als die Zentralstufe zugelassen werden. Die Entscheidung fällt dabei anhand der Stufe, die sich am nächsten an der Zentralstufe befindet und eine andere Länge besitzt. Mittels des zweiten `SelectFirstOne()`-Moduls wird entschieden, welche der beiden möglichen Stufenlängen mehrmals vorkommen darf, da aufgrund der Rasterisierungsregeln bei einer normalen Geraden immer nur eine Stufenlänge mehrmals hintereinander vorkommen darf. In den `MaskEnd()`-Modulen werden schließlich noch alle Stufen ausgeblendet, die durch vorherige Maskierungsaktionen keine Verbindung mehr zur zentralen Stufe besitzen. Das `SelectFirstOne()`-Modul wurde genau wie das `MaskEnd()`-Modul wieder mittels einer Case-Anweisung modelliert und durch Synopsys minimiert.

Sollen weitere Rasterisierungsregeln angewendet werden, so müssen sie innerhalb dieses Moduls umgesetzt werden.

In dem `AddJumps()` Modul (Figur 50, Tabelle 26) werden die Ergebnisse der bisherigen Stufen zusammenaddiert, so daß sich ein Endpunkt der Geraden ergibt. Die mask gilt dabei als Bitmaske, die angibt, welche der Stufenlängen in jumps mit einbezogen werden sollen. Die letzte Stufe wird, wie bereits beschrieben, nur mit der halben Länge und Höhe berücksichtigt.

Nunmehr soll das Module `ComputeMixFactor ()` (Figur 51, Tabelle 27) beschrieben werden. Die eigentliche Berechnung des Mischfaktors besteht darin, aus dem Anfangs- und Endpunkt eine Gerade zu bestimmen, wobei nur der y-Wert an der Stelle  $x=0$  dieser Geraden interessiert. Je nachdem, welches Pixel gerade betrachtet wird (über oder unter dem Farbsprung), wird der eben ermittelte y-Wert `yReal` invertiert oder nicht (Multiplexer links unten), so daß der y-Wert nun 1:1 dem Mischfaktor im Bereich 0..1 entspricht. Durch die letzten beiden Multiplexer wird der Mischfaktor nur noch auf den Bereich 0..1 zurechtgeschnitten, so daß keine Überläufe entstehen. Die Entscheidung, ob das Pixel über oder unter dem Farbsprung bearbeitet wird, liegt durch die Verwendung des Moduls schon fest. Der drittletzte Multiplexer wählt somit nur alternative Zweige aus, die über einen Parameter selektiert werden.

Für die Bestimmung der Geraden wird der Kehrwert des x-Abstandes der beiden

Endpunkte benötigt. Zu diesem Zweck wird das Modul `recip()` eingeführt.

Bei diesem Modul und dem anschließenden `MaskMixFactors()` ist eine Besonderheit anzumerken. Die beiden Module arbeiten nämlich überlappend. Während das Modul `ComputeMixFactor()` noch damit beschäftigt ist, den Mischfaktor zu berechnen, sind die Länge `len` und das zusätzliche Flag `no_good` bereits an `MaskMixFactors()` weitergeleitet worden, und befinden sich dort in Bearbeitung. Der Ausgang `mix` ist also immer um ein Takt verzögert, so daß insgesamt ein Bearbeitungstakt und damit zusätzliche Register eingespart werden konnten.

Die Kehrwertbildung (Modul `Recip()`, Figur 52, Tabelle 28) wird bei diesem einfachen Fall auf ein Tabellen-Lookup zurückgeführt. Der Eingangswert dient dabei als Adresse für einen ROM-Zugriff, bei dem als Ergebnis der Kehrwert geliefert wird. Um bei der Tabellenbreite ein Bit zu sparen, wurde der Fall  $x = 1$  getrennt behandelt, da dies der einzige Wert ist, bei dem im zugelassenen Eingangswertebereich 1,0..15,0 (4.1 Fixpunktformat des Einganges) eine Vorkommastelle entstehen kann. (Der Wert 0,0 würde einen Fehler produzieren, und der Wert 0,5 kann aufgrund der Form der vorherigen Berechnungen auch nicht auftreten.)

Für die Berechnung des linken Zumischfaktors, wird die verfolgte Gerade des vorherigen Pixels bezüglich des rechten Mischfators wiederverwendet, da die beiden Geraden vollkommen identisch sind. Lediglich im Fall des ersten Pixels in einer Zeile gilt dies nicht, so daß über `xmask` der entsprechende Mischfaktor und auch alle zusätzlichen Informationen gelöscht werden, Modul `CompuLeftEdge`, Figur 53, Tabelle 29).

Die bisher berechneten Mischfaktoren wurden immer nur aufgrund einer einzigen Geraden bestimmt. Um zu einem globaleren Eindruck zu gelangen und somit die bestmöglichen Mischfaktoren für ein Pixel zu bestimmen, werden im Modul `MaskMixFactor()` alle vier Geraden betrachtet und, falls nötig, werden einige Mischfaktoren noch ausmaskiert. Die Notwendigkeit entsteht durch Rauschen, welches durch die Verwendung des Differenzoperators als Kantenerkenner resultiert (auch jeder andere Kantenoperator würde in irgendeiner Weise Rauschen produzieren). Als Beispiel betrachte man eine horizontal orientierte Kante zwischen zwei Farben. Im horizontalen Kantenbild ergibt sich das gewohnte Bild der erwünschten Sprünge. Im vertikalen Kantenbild wird jedoch bei jedem Sprung auch ein Kantenpixel markiert, welches aber keine sinnvolle Bedeutung hat. Da bei der Verfolgung einer Geraden dieser Fall nicht erkannt wird, werden diese Fälle unter

anderen im Modul `MaskMixFactors()` (Figur 54, Tabelle 30) ausgeblendet.

Die tatsächliche Farbe des Pixels wird aufgrund seiner ursprünglichen Farbe und der Farben der vier Nachbarn bestimmt. Zu diesem Zwecke werden die benötigten Farben geladen, wobei nacheinander die rechte Farbe als zentrale Farbe des nächsten Pixels und linke Farbe des übernächsten Pixels fungiert. In `ComputeCenterFactor()` wird der noch fehlende Mischfaktor für das zentrale Pixel bestimmt, worauf dann in `Mixing_channel()` des Moduls `Mixing()` (Figur 56, Tabelle 31) die eigentliche Farbmischung pro Farbkanal stattfindet.

Die Berechnung des zentralen Mischfaktors im Modul `ComputeCenterFactor()`, Figur 57, Tabelle 32, beruht auf der Tatsache, daß alle Mischfaktoren zusammen 1.0 ergeben müssen, da nur so sichergestellt ist, daß keine Farbüberläufe und damit Farbverfälschungen produziert werden. Falls vertikal und horizontal zugemischt wird, so sind die Faktoren auf 2.0 normiert, um die maximal mögliche Genauigkeit herauszubekommen. Die Division durch zwei (Shift um eine Stelle nach rechts, entspricht einer einfachen Verdrahtung in Hardware) wird erst zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführt und über `shift` initiiert.

Die endgültige Mischung der Farben findet nach der Mischungsformel im Modul `Mixing_Channel()` (Figur 58, Tabelle 33) statt. Nach der unter Umständen nötigen Division durch zwei, findet eine Rundung statt, mit der die Genauigkeit noch etwas erhöht werden kann, worauf sich ein Abfangen eines Überlaufes anschließt.

Beim Display-Prozeß wird das im Framebuffer gespeicherte Bild über die RAMDAC in analoge Signale gewandelt, die der Monitor benötigt, um das Bild anzuzeigen. Da im Framebuffer aber nicht zu jedem Zeitpunkt ein fertiges Bild steht, weil die rasterisierten Pixel immer erst nach und nach abgelegt werden, würde man den Aufbau jedes einzelnen Bildes mitbekommen (vor jedem Bild wird der Framebuffer gelöscht). Um dieses Flimmern zu vermeiden, wird die Double-Buffer-Technik verwendet. Dabei arbeitet der Rasterisierer auf dem einen Framebuffer, während der Inhalt des anderen Framebuffer auf dem Monitor dargestellt wird. Ist das nächste Bild fertig gerendert, so wird zwischen den beiden Buffern umgeschaltet und sie vertauschen ihre Funktionen. Ist die Anzeige eines Bildes beendet, bevor das nächste Bild fertig gerendert wurde, so wird das vorherige Bild noch einmal angezeigt.

Figur 59 enthält links eine mögliche Systemkonfiguration: Der `Renderer` schickt die

Farbwerte der rasterisierten Pixel und weitere Informationen (x,y-Position, z-Wert für z-Buffering) an beide Framebuffer, von denen jedoch nur einer die Werte in den Speicher übernimmt. Der Inhalt des anderen Framebuffers wird an den RAMDAC übertragen. Um eine möglichst hohe Bildwiederholrate zu gewährleisten, d.h., um Bildflimmern zu vermeiden, wird meistens nicht nur ein Pixel pro Takt an die RAMDAC übertragen, sondern zwei oder auch vier; so kann die Takt-rate außerhalb des Chips klein gehalten werden, und trotzdem eine hohe Übertragungsrate erreicht werden. Die Pixel werden in der RAMDAC dann wieder serialisiert und mit einer entsprechend vielfachen Taktrate an den Monitor gesendet. Die Idee, das Post-Antialiasing im Display-Prozeß einzubauen, beruht darauf, daß einfach nur der normale RAMDAC gegen einen um die Antialiasing-Funktion erweiterten RAMDAC ausgetauscht werden kann (Figur 60). Der Renderer und der Framebuffer sind von dieser Änderung nicht betroffen, so daß es möglich wird, Antialiasing auch in den Systemen einzubauen, die gar nicht dafür vorgesehen worden sind. Dies ist die Besonderheit des vorliegenden Verfahrens, die von den bisherigen Antialiasing-Verfahren nicht geboten worden ist.

Ein Beispiel eines RAMDAC befindet sich in Figur 61. In diesem speziellen Fall können bis zu vier Pixel pro Takt übernommen werden. Da das Anti-aliasing-Verfahren aber in der Grundvariante immer nur ein Pixel pro Takt bearbeiten kann, kann es nicht einfach vor dem RAMDAC geschaltet werden. Für den Einbau sind zwei Alternativen günstig:

1. Einbau vor dem RAMDAC

Hier müssen immer vier Pixel gleichzeitig pro Takt bearbeitet werden; die gesamte Logik müßte also vier mal parallel aufgebaut werden. Der Speicheraufwand ändert sich nicht. In jedem Takt wird das Kantenfenster um vier Pixel weitergeschoben, wobei jede Logikeinheit immer einen der vier Pixel bearbeitet.

2. Einbau in dem RAMDAC nach dem Demultiplexer

Nach dem Demultiplexer muß immer nur ein Pixel pro Takt bearbeitet werden, da durch das Latch und den anschließenden Demultiplexer die vier parallel vorliegenden Pixel serialisiert werden, jedoch wird hier eine höhere Taktrate benötigt. Die Taktrate in diesem Bereich ist nicht konstant, sondern richtet sich nach der Bildschirmauflösung und der erwünschten Bildwiederholrate. Der

Entwurf muß sich immer nach der höchsten Taktrate richten. Bei heute üblichen Taktraten von bis zu 250 MHz müßten dann entsprechend mehr Registerstufen in den Logikblock des Antialiasing-Systems eingebaut werden. Bei so hohen Taktraten muß jedoch überprüft werden, ob das überhaupt durchführbar erscheint. Eine Möglichkeit der Beschränkung auf kleinere Taktraten in der Antialiasing-Einheit besteht darin, daß nur Bilder bis zu einer bestimmten Auflösung bearbeitet werden. Alle Bilder der höheren Auflösung (und damit höheren Taktrate) werden an der Antialiasing-Einheit vorbeigeschleust, da bei so hohen Auflösungen die Aliasing-Effekte nicht mehr so stark hervorstechen.

Das zuvor beschriebene Verfahren des Double-Buffers kann auf einen Triple-Buffer erweitert werden, wobei der Inhalt eines Framebuffers auf dem Monitor dargestellt wird, der zweite mittels des Post-Antialiasings bearbeitet wird, und im dritten Framebuffer wird bereits das nächste Bild durch den Renderer erzeugt. Dieser Vorgang ist in Figur 62 schematisch als Zyklus angedeutet. Als Blockschaltbild ist ein Tripelpuffer in Figur 63 wiedergegeben. Drei Framebuffer sind parallelgeschaltet und erhalten ihre Signale zeitlich versetzt in zyklischer Vertauschung bzw. geben sie entsprechend ab.

Der Zeitbedarf der einzelnen Prozesse ist sehr unterschiedlich. Erfordert etwa das Anzeigen eines Bildes ca. 1/80-Sekunde, so benötigt der Renderingprozeß in der Regel mindestens 1/30-Sekunde. Die Zeit für das Antialiasing des Bildes wird sich irgendwo zwischen diesen beiden Extremwerten bewegen.

Der Ablauf bei Verwendung eines Triple-Buffers wird nun wie folgt beschrieben:

Ist die Anzeige eines Bildes beendet, so wird kontrolliert, ob das nächste Bild bereits antialiast wurde. Ist das Bild fertig, so übernimmt der bisherige Antialiasing-Buffer die Übertragungsfunktion für das neue Bild an den RAMDAC. Ist das Bild noch nicht fertig, so wird das gleiche Bild noch einmal an den RAMDAC übertragen. (Beim Double-Buffer wird jedes Bild etwa zwei- bis viermal angezeigt.)

Ist das Antialiasing eines Bildes beendet, so wartet der Prozeß auf die Fertigstellung des nächsten Bildes durch den Renderer. Steht das nächste Bild zur Verfügung, so übernimmt der bisherige Renderer-Framebuffer die Funktion des Antialiasing.

Ist der Rendererprozeß mit der Generierung eines neuen Bildes fertig, so wird

unverzöglich auf den ursprünglichen Display-Buffer umgeschaltet, wo sofort mit der Bearbeitung eines neuen Bildes begonnen werden kann. Der Rendererprozeß muß keinesfalls auf den Displayprozeß warten, da aufgrund der schon beschriebenen Zeitverhältnisse das Anzeigen des Bildes an den Antialiasing-Buffer übertragen wurde.

Für die Verwendung im Triple-Buffer-Betrieb müssen einige Änderungen am Grundsystem des Antialiasing vorgenommen werden, wie es in Figur 64 dargestellt ist.

Für den Triple-Buffer-Prozeß ist es nicht notwendig, die Farbwerte nach der Kantengenerierung aufzuheben, da sie noch einmal aus dem Speicher gelesen werden können. Beim Display-Prozeß bestand diese Option nicht, da jeder Farbwert nur einmal übertragen wurde. Demzufolge werden die Farbwerte, die aus dem EdgeValueGenerator() kommen, verworfen (wie man an dem nicht beschalteten Ausgang sieht) und erst dann wieder aus dem Speicher geholt, wenn sie für die Mischung der Farben benötigt werden.

Die Speicherzugriffe verdoppeln sich nicht, wie eigentlich anzunehmen wäre, denn beim zweiten Auslesen müssen nicht alle Farbwerte noch einmal gelesen werden, sondern nur diejenigen, die wirklich zur Farbmischung benötigt werden. Statistische Untersuchungen ergaben, daß im schlimmsten Fall 20% der Pixel des Bildes noch einmal gelesen werden müssen. Natürlich müssen auch nicht alle Pixel in den Speicher zurückgeschrieben werden, sondern nur diejenigen, die wirklich eine Farbveränderung erfahren haben (erkenntlich durch das Ausgangssignal mixing des Moduls Mixing()), was in maximal 10% der Fälle geschieht. Statistisch gesehen müssen pro Pixel demnach 1,3 Speicherzugriffe geschehen (100% Bild einmal auslesen, 20% zu mischende Pixel noch einmal lesen, 10% der Pixel zurückschreiben).

Die kombinatorische Logik des Antialiasing-Systems ließe es an sich zu, daß in jedem Takt ein weiteres Pixel fertiggestellt wird, dies ist jedoch entbehrlich. Um bei einer Bildschirmauflösung von 1280 x 1024 die geforderte Bildgenerierungsrate von 25 Bildern pro Sekunde zu erreichen, müssen pro Sekunde  $1280 \times 1024 \times 25 = 32,768$  Millionen Pixel bearbeitet werden. Bei einer angenommenen Taktrate von 66MHz für das System stehen also pro zu bearbeitendes Pixel 2,01 Takte Zeit zur Verfügung. Bei höheren Auflösungen kann dieser Wert noch kleiner werden, jedoch wird dann der Renderer keine Bildgenerierungsrate von 25 Bilder pro Sekunde

Die verwendete Speicherabbildung kommt dem hier verwendeten Verfahren auch sehr entgegen. Beim Auslesen der Pixel für die Kantengenerierung wird das komplette Bild linear zeilenweise ausgelesen, d.h., es ist möglich, in 32 Takten 64 Pixel aus dem Speicher zu lesen, ehe ein Row-Wechsel erfolgen muß, der 7 Takte benötigt. Für diesen Prozeß ergibt sich demnach eine Übertragungsrate von 64 Pixeln in 39 Takten = 1,64 Pixel/Takt. Jedoch ist dies nicht der einzige Prozeß der auf dem Speicher abläuft. Es werden konkurrierend dazu die schon angesprochenen 20% der Pixel für die Mischung geholt, und 10% der Pixel wieder zurückgeschrieben. Durch geeignetes Auspuffern der Anforderungen ist es möglich, die Rowwechsel dazu zu nutzen, um zwischen den einzelnen Prozessen umzuschalten.



Für den zweiten Auslese-Prozeß und den Schreibe-Prozeß sollten die Anforderungen so lange gesammelt werden, bis alle eine Row betreffende Anfragen auf einmal bearbeitet werden können, so daß wiederum möglichst wenige Row-Wechsel sogar bei diesen nicht mehr linearen Vorgängen durchgeführt werden müssen, wie es in Figur 66 dargestellt ist.

Der Ablauf im Modul RAM-Schnittstelle() für die aktuell aus dem Speicher zu holenden Pixel ist wie folgt ausgebildet:

- Lineares Auslesen aus dem Speicher die Pixel, die für die Kantengenerierung benötigt werden, und schreibe sie in die EdgeReadFIFO() bis du am Ende einer Row angekommen bist. Hierfür wird intern ein Zähler verwendet, der sich merkt, bis zu welchem Pixel gelesen wurde.
- Am Ende einer Row wird kontrolliert, wie der Status der anderen beiden Prozesse jeweils aussieht. Sind in einer der beiden FIFOs (RequestFIFO() und WriteFIFO()) alle eine Row betreffende Anfragen eingegangen, so werden sie hintereinander an den Speicher weitergeleitet. Ist dies nicht der Fall, wird weiter die EdgeReadFIFO() gefüllt.

Die EdgeReadFIFO() ist also dimensioniert, daß sie möglichst nie leer wird, so daß immer weiter gearbeitet werden kann.

Die aus MaskMixFactor() herauskommenden Mischfaktoren werden mittels des Moduls cmp() darauf hin überprüft, welcher der Mischfaktoren ungleich Null ist. Sollte dies bei keinem der Fall sein, so muß das aktuelle Pixel nicht gemischt werden, und die Mischfaktoren werden verworfen. Ist jedoch mindestens einer der Faktoren ungleich Null, so werden sie zusammen mit der aktuellen Pixelnummer in der MixFactorFIFO() abgespeichert, um sie dann später (sobald die Farbwerte aus dem Speicher geholt wurden) für die eigentliche Mischung zu verwenden. Ausgehend von den Mischfaktoren werden dann in der RequestFIFO() die benötigten Farbanforderungen zwischengespeichert. Bei benachbarten Pixeln werden unter Umständen die gleichen Farbwerte benötigt, so daß diese doppelten Anforderungen aussortiert werden. Sobald alle eine Row betreffenden Anfragen eingegangen sind, können sie an die RAM-Schnittstelle() übermittelt werden, die dann daraufhin die Farbinformation an die ReturnFIFO() zurückgibt. In der ReturnFIFO() werden dann aufgrund der am Ausgang der MixFactorFIFO() stehenden Mischfaktoren die benötigten Farbinformationen parallelisiert, und sobald alle benötigten Farben

Die Erfindung beschränkt sich in ihrer Ausführung nicht auf die vorstehend angegebenen bevorzugten Ausführungsbeispiele. Vielmehr ist eine Anzahl von Varianten möglich, welche von der dargestellten Lösung auch bei grundsätzlich anders gearteten Ausführungen Gebrauch macht.

## Patentansprüche

1. Verfahren zum Eliminieren unerwünschter Stufungen an Kanten bei Bilddarstellungen im Zeilenraster, insbesondere im On-line Betrieb, gekennzeichnet durch die Schritte:
  - a) Anwendung eines Kantenoperators auf einen Bildteil zur Grobermittlung mindestens eines gerasterten Kantenverlaufs,
  - b) Bestimmung der Position mindestens eines ersten Pixels aus der Menge derjenigen Pixel, die den gerasterten Kantenverlauf bilden oder an diesem gerasterten Kantenverlauf angrenzen,
  - c) Approximation einer Geraden zur Ermittlung eines wahrscheinlichen Verlaufs der ungerasterten Bildkante in der Nähe des ersten Pixels,
  - d) Ermittlung eines Kriteriums aus der Approximationsgeraden und der Position des ersten Pixels für die Zumischung einer Farbe X zu der Farbe C im betrachteten ersten Pixels und
  - e) Mischung der ermittelten Farbe X zu der Farbe C im betrachteten ersten Pixel.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Kriterium des Verfahrensschrittes d) in Abhängigkeit von der Lage des betrachteten Pixels relativ zur Approximationsgeraden festlegt, welche Farbe X zu der Farbe C des betrachteten Pixels zugemischt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Kriterium gemäß Verfahrensschritt d) in Abhängigkeit von der Lage des betrachteten Pixels relativ zur Approximationsgeraden festlegt, daß die Farbe mindestens eines benachbarten Pixels gewichtet zur Farbe des betrachteten Pixels zugemischt wird.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet,

zeichnet, daß bei einem betrachteten Pixel, das von der Approximationsgeraden nicht geschnitten wird, die Farbe unverändert bleibt.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß bei einem betrachteten Pixel, das von der Approximationsgeraden geschnitten wird, die resultierende Farbe R nach Maßgabe des folgenden Kriteriums bestimmt wird:

die Approximationsgerade teilt das betrachtete Pixel in zwei Teilflächen  $F_1$ ,  $F_2$ , wobei  $F_1 + F_2 = 1$ , mit 1 ist die Gesamtfläche des Pixels, wobei  $F_1$  diejenige Teilfläche ist, in welcher der Pixelmittelpunkt liegt;

- zugemischt wird zu der Farbe C des betrachteten Pixels die Farbe X desjenigen benachbarten Pixels, welche an die längste vom Raster gebildete Kante der Teilfläche  $F_2$  angrenzt.

6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß sich die resultierende Farbe R aus der ursprünglichen Farbe C des betrachteten Pixels und der zugemischten Farbe X eines benachbarten Pixels nach folgender Gleichung ergibt:

$$R = F_1 \times C + F_2 \times X$$

7. Verfahren nach Anspruch 5 oder 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Teilflächen  $F_1$ ,  $F_2$  durch ein geeignetes Approximationsverfahren approximiert werden.
8. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die genannten Verfahrensschritte auf einen mittels eine Rendering und/oder Shading-Verfahrens behandelten Bildteil angewendet werden.
9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß das Shading/-Rendering dreiecks- oder Scanlinebasiert ist, oder daß es sich um ein Gouraud-oder Phong-Shading handelt.
10. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die vorgenannten Verfahrensschritte a) bis e) einzeln oder in

Gruppen im zeitlichen Versatz ausgeführt werden.

11. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß der zeitliche Versatz mindestens eine Bildzeile beträgt.
12. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Verarbeitung im zeitlichen Versatz in einem Framebuffer ohne weitere Zwischenspeicherung erfolgt.
13. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Approximationsgerade über mehrere Stufen des gerasterten Kantenverlaufs verläuft, und daß die Approximationsgerade endet, wenn die Kriterien
  - 1) Es können maximal zwei verschiedene Stufenlängen vorkommen, deren Stufenlängen sich außerdem um maximal 1 unterscheiden dürfen.
  - 2) Nur eine der beiden Stufenlängen darf mehrmals hintereinander auftreten.
  - 3) Durch das Aneinanderreihen der Anzahlen der Stufen, die die gleiche Länge haben, erhält man eine Zahlensequenz, bei der abwechselnd immer eine Eins und dann eine beliebige Zahl ( $> 0$ ) steht. Die Einsen (nur die an jeder zweiten Position) werden aus dieser Sequenz gestrichen. Bei der erhaltenen Sequenz dürfen wieder nur zwei verschiedene Zahlen vorkommen, die sich um eins unterscheiden.
  - 4) Bei der unter 3. erhaltenen Sequenz darf nur eine der beiden möglichen Zahlen mehrmals hintereinander auftreten.
  - 5) Durch wiederholtes Anwenden der Regeln 3. und 4. auf die Zahlensequenz, läßt sich ein immer globalerer Blick auf die Kante gewinnen.

in aufsteigender Reihenfolge überprüft werden und mindestens ein Kriterium nicht erfüllt ist.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Approximationsgerade über mehrere Stufen des gerasterten Kantenverlaufs verläuft, und daß die Approximationsgerade endet, wenn eines der Kriterien

- 1) Es können maximal zwei verschiedene Stufenlängen vorkommen, deren Stufenlängen sich außerdem um maximal 1 unterscheiden dürfen.
- 2) Nur eine der beiden Stufenlängen darf mehrmals hintereinander auftreten.
- 3) Durch das Aneinanderreihen der Anzahlen der Stufen, die die gleiche Länge haben, erhält man eine Zahlensequenz, bei der abwechselnd immer eine Eins und dann eine beliebige Zahl ( $> 0$ ) steht. Die Einsen (nur die an jeder zweiten Position) werden aus dieser Sequenz gestrichen. Bei der erhaltenen Sequenz dürfen wieder nur zwei verschiedene Zahlen vorkommen, die sich um eins unterscheiden.
- 4) Bei der unter 3. erhaltenen Sequenz darf nur eine der beiden möglichen Zahlen mehrmals hintereinander auftreten.

oder eines der Kriterien 1), 2), 3) oder eines der Kriterien 1), 2) nicht erfüllt ist.

15. Verfahren nach einem der der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch das Vorsehen eines Tripple-Buffers, wobei sich die drei resultierenden Buffer in zyklischer Vertauschung parallel die Verfahrensschritte Rendering, Post-Antialyasing und Bildwiedergabe teilen.

## Zusammenfassung

Verfahren zum Eliminieren unerwünschter Stufungen an Kanten bei Bilddarstellungen im Zeilenraster, insbesondere im On-line Betrieb, aufweisend die Schritte:

- a) Anwendung eines Kantenoperators auf einen Bildteil zur Grobermittlung mindestens eines gerasterten Kantenverlaufs,
- b) Bestimmung der Position mindestens eines ersten Pixels aus der Menge derjenigen Pixel, die den gerasterten Kantenverlauf bilden oder an diesem gerasterten Kantenverlauf angrenzen,
- c) Approximation einer Geraden zur Ermittlung eines wahrscheinlichen Verlaufs der ungerasterten Bildkante in der Nähe des ersten Pixels,
- d) Ermittlung eines Kriteriums aus der Approximationsgeraden und der Position des ersten Pixels für die Zumischung einer Farbe X zu der Farbe C im betrachteten ersten Pixels und
- e) Mischung der ermittelten Farbe X zu der Farbe C im betrachteten ersten Pixel.

Figur 24

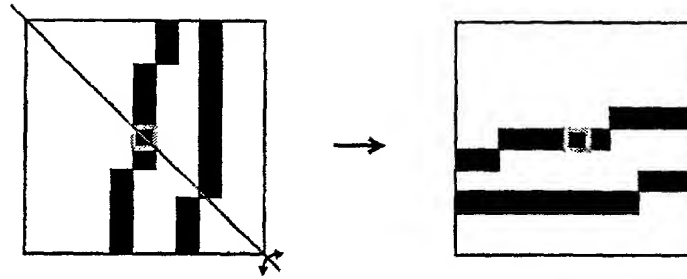


Fig. 1

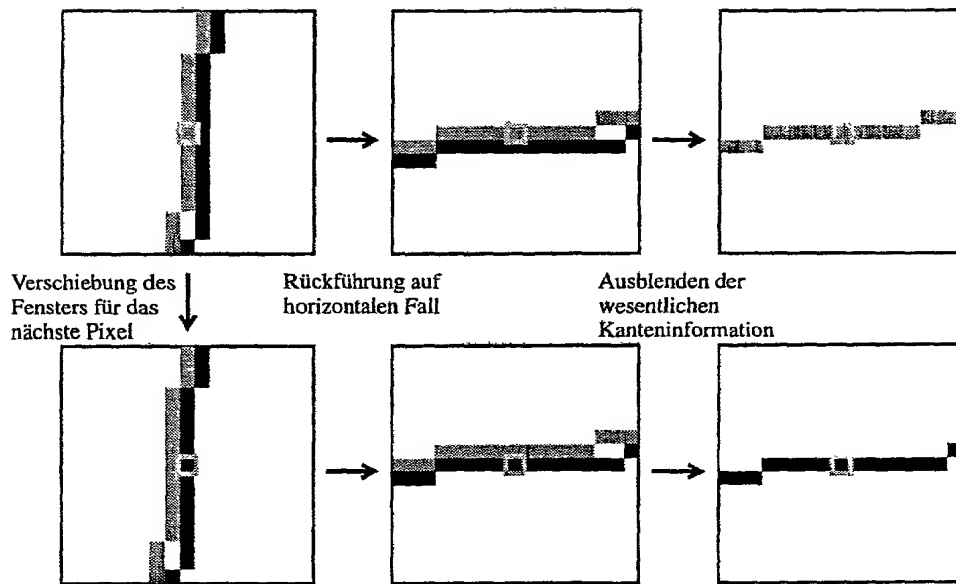


Fig. 2

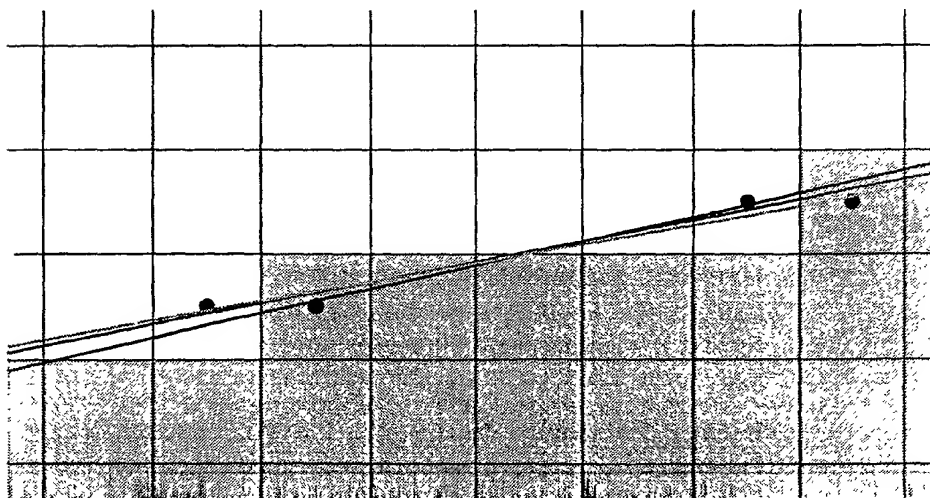


Fig. 3



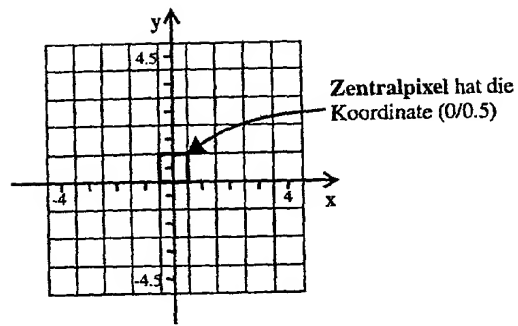


Fig. 4

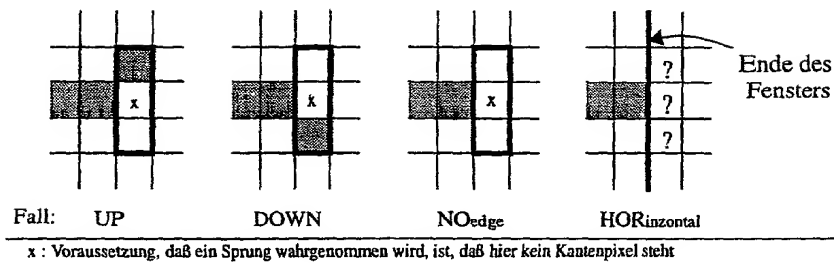


Fig. 5

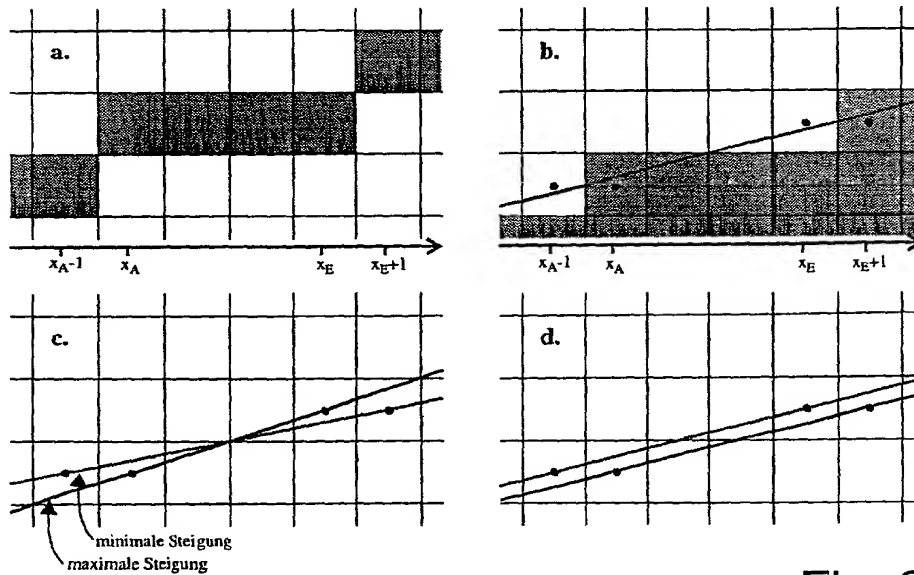


Fig. 6

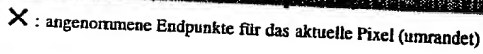
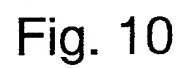


Fig. 8





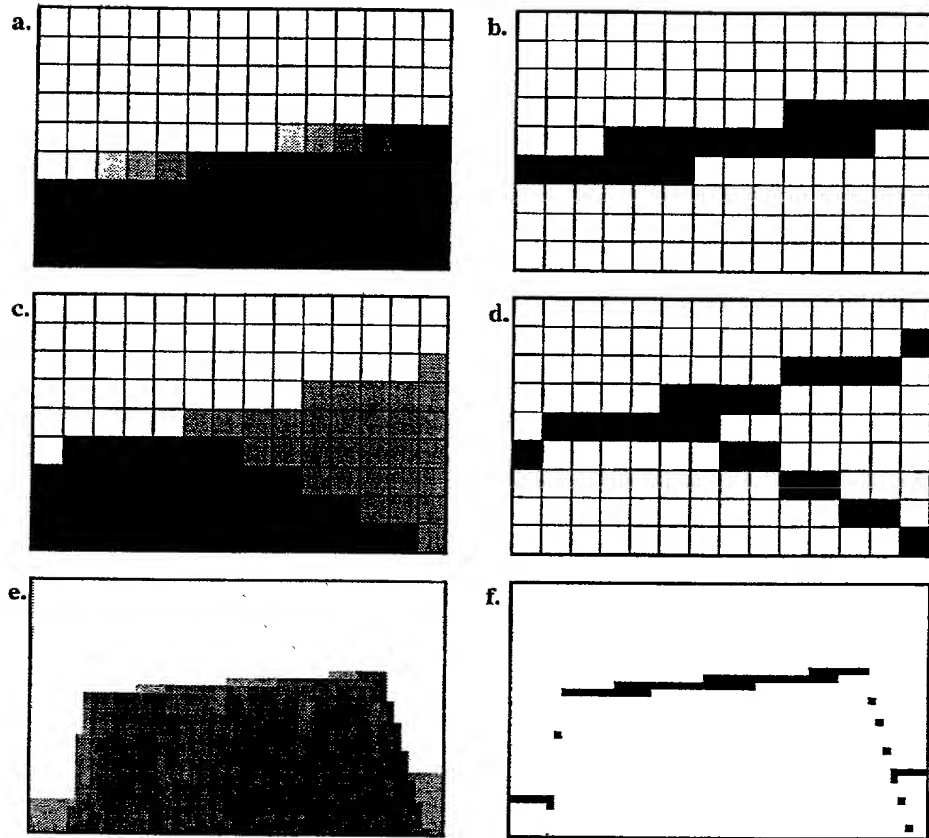


Fig. 11

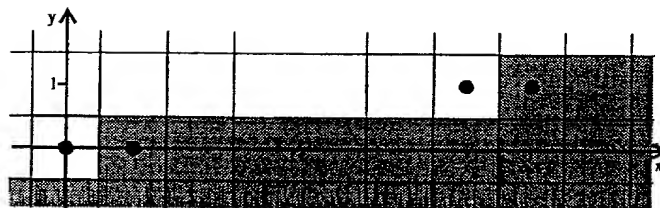


Fig. 12

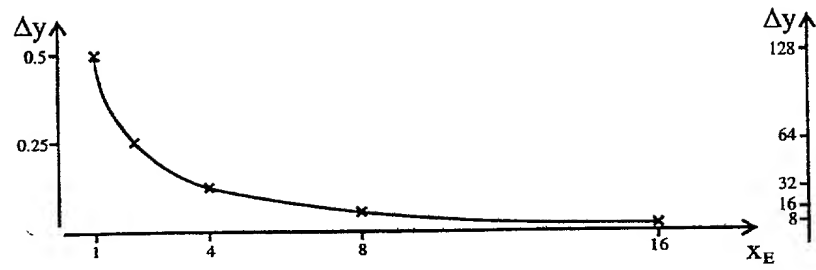


Fig. 13

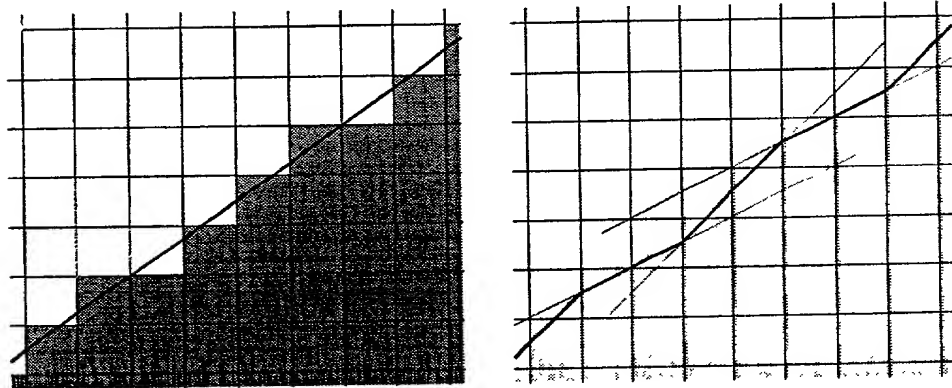


Fig. 14

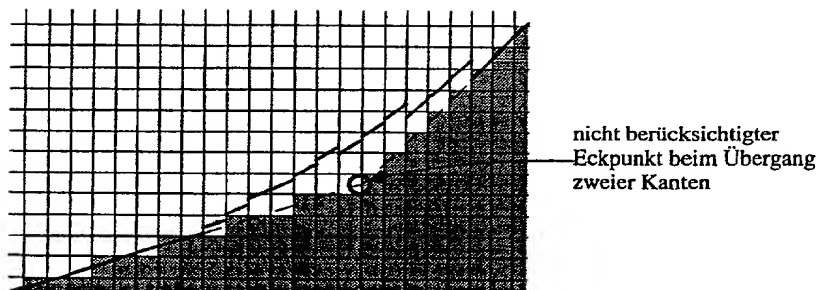


Fig. 16

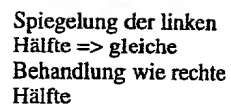


Fig. 17

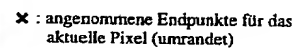


Fig. 17

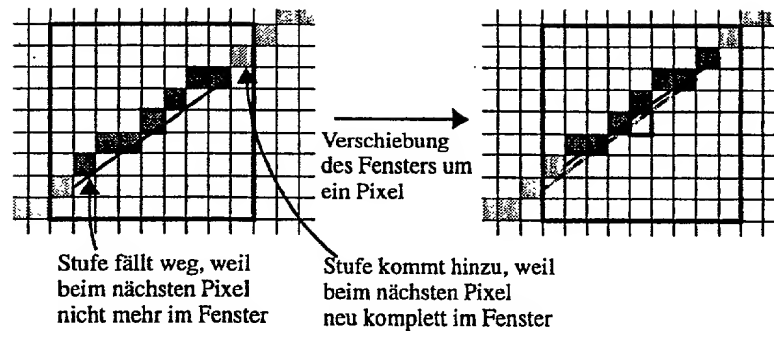


Fig. 18

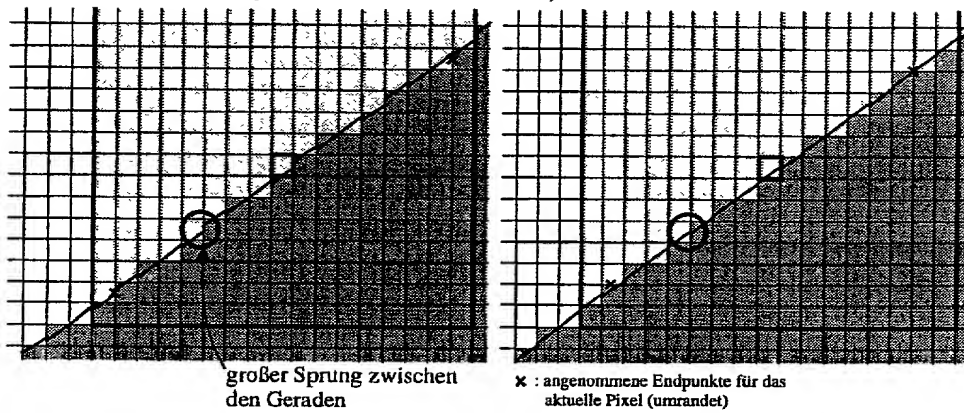


Fig. 19

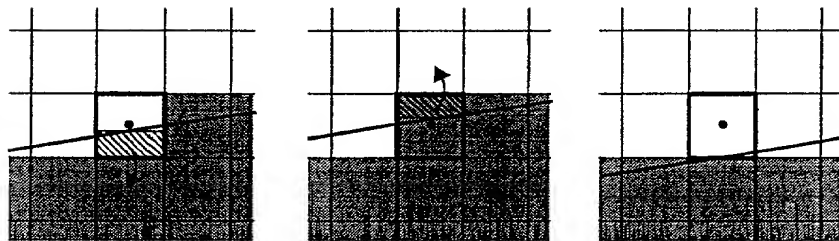


Fig. 20

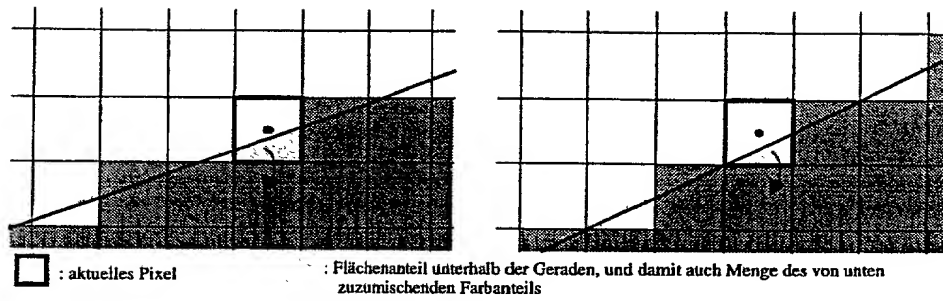


Fig. 21

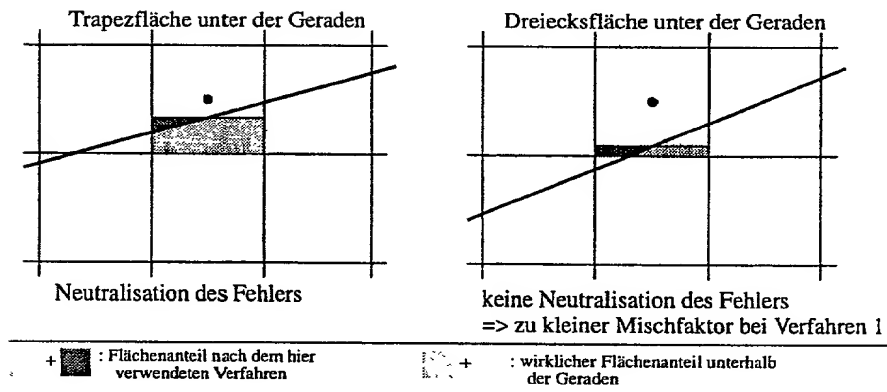


Fig. 22

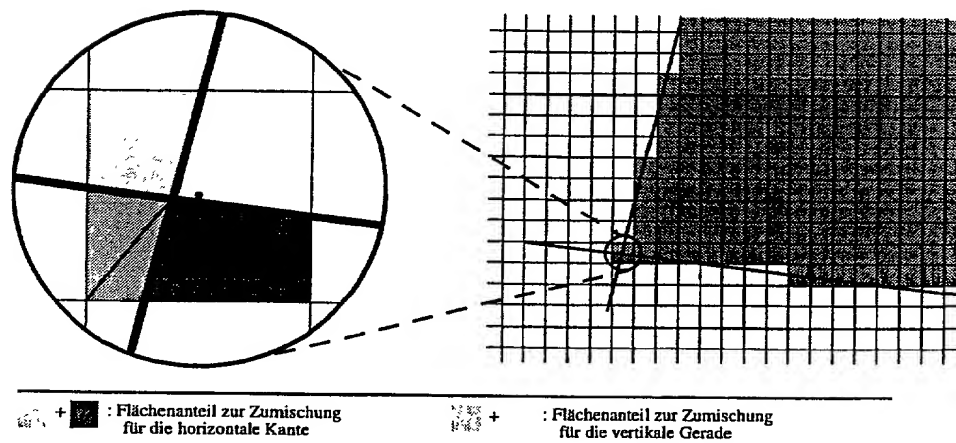


Fig. 23



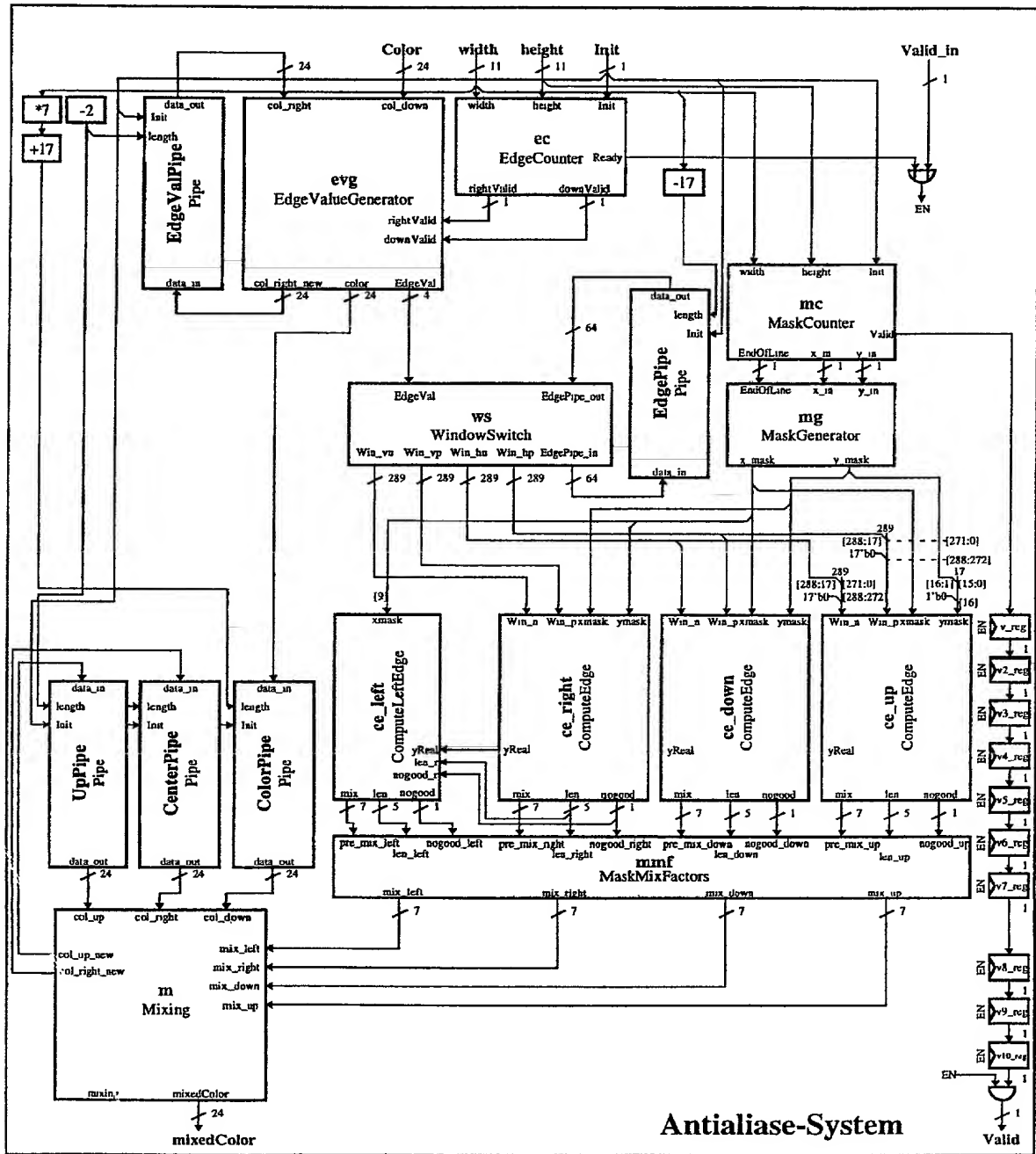


Fig. 24

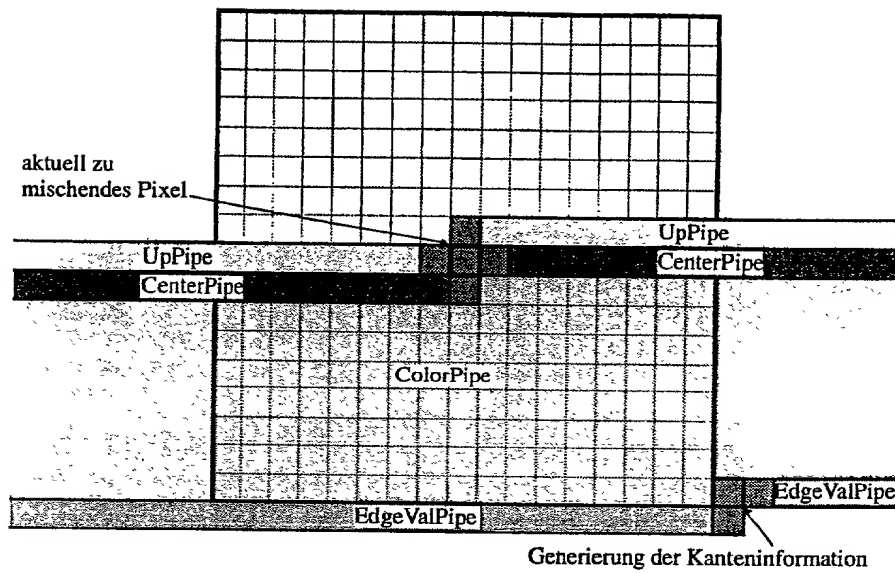


Fig. 25

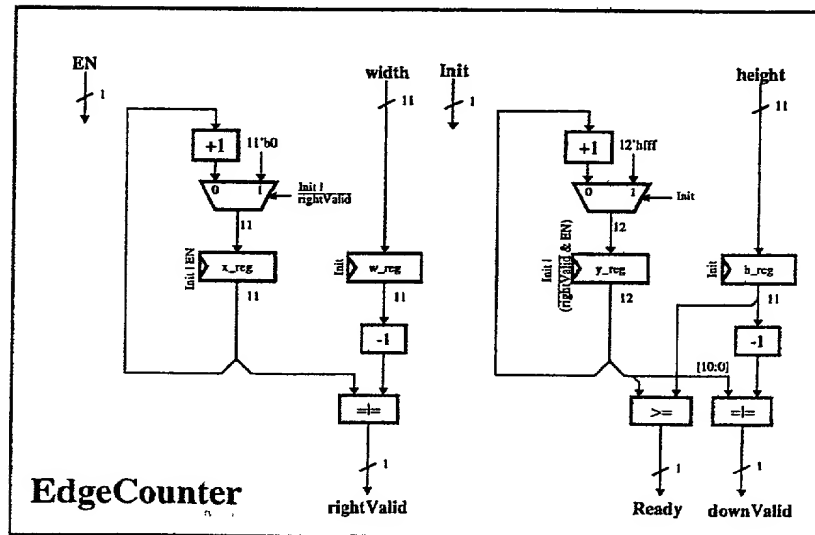


Fig. 26

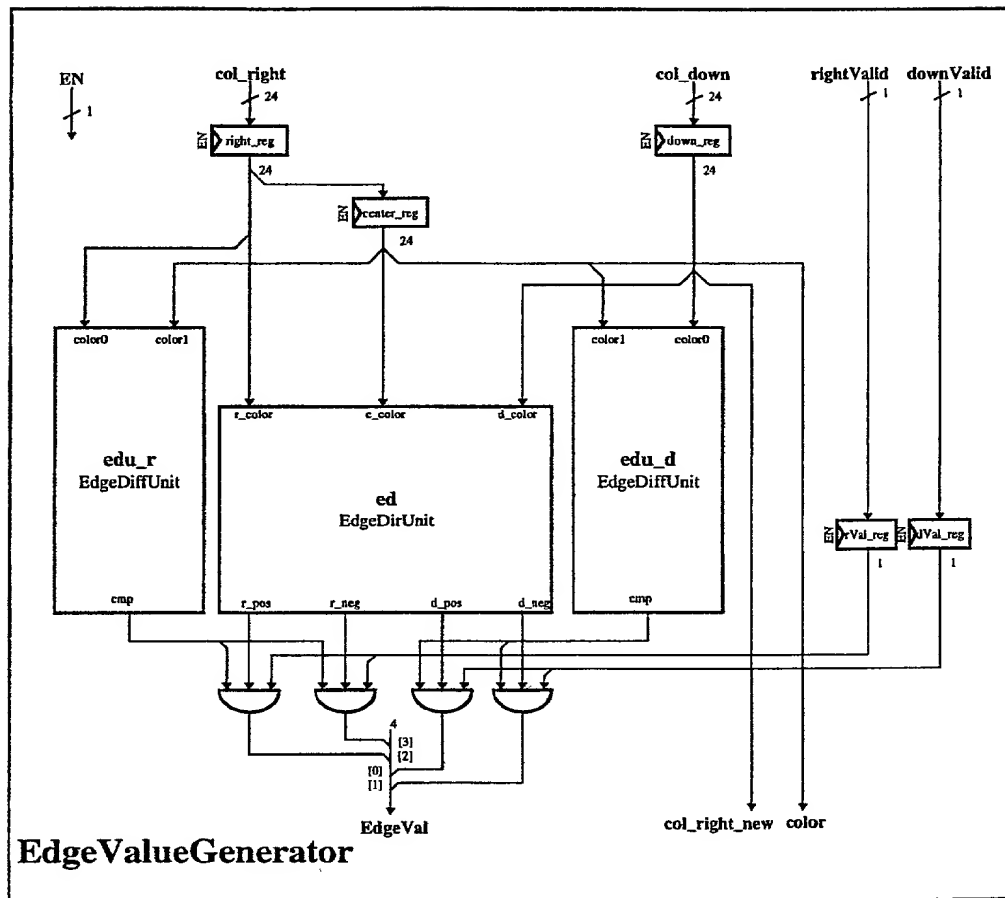


Fig. 27

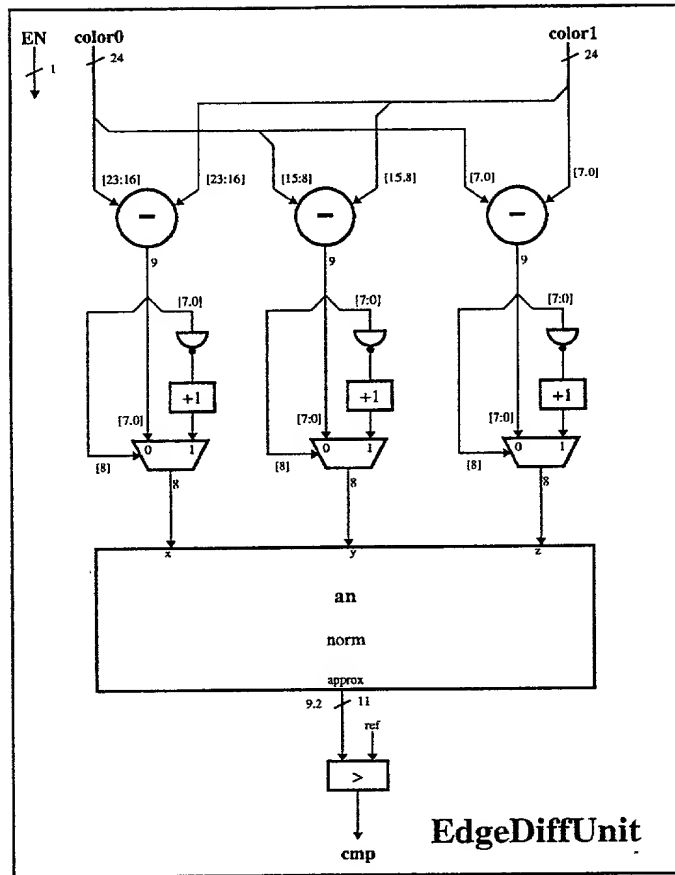


Fig. 28

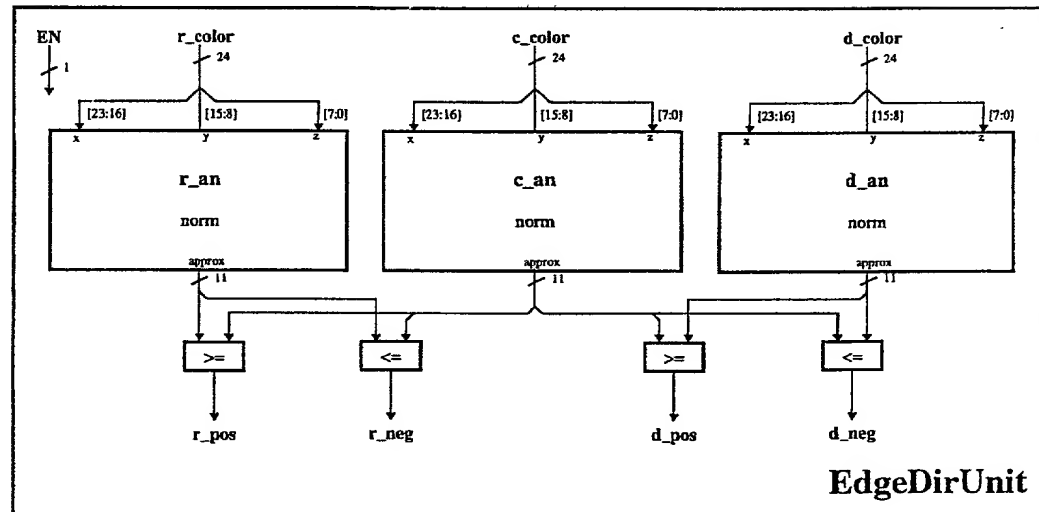


Fig. 29

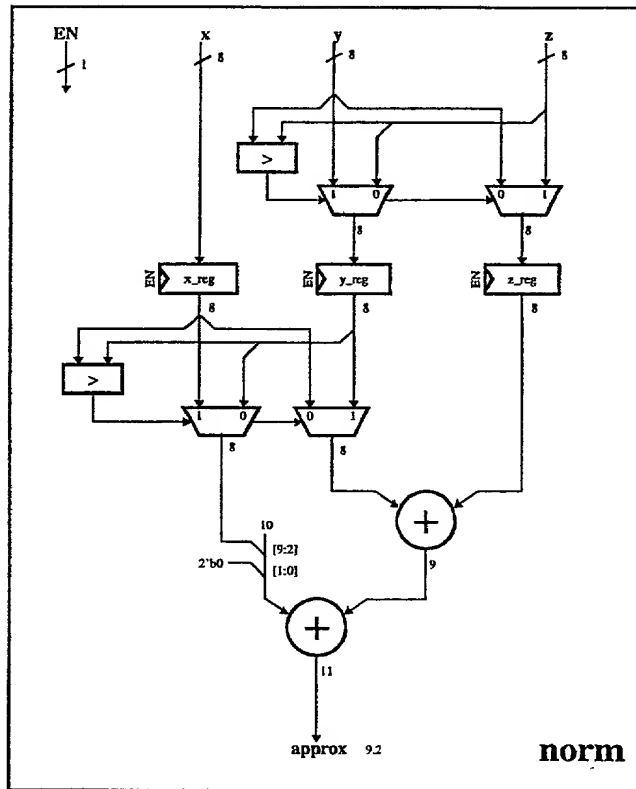


Fig. 30

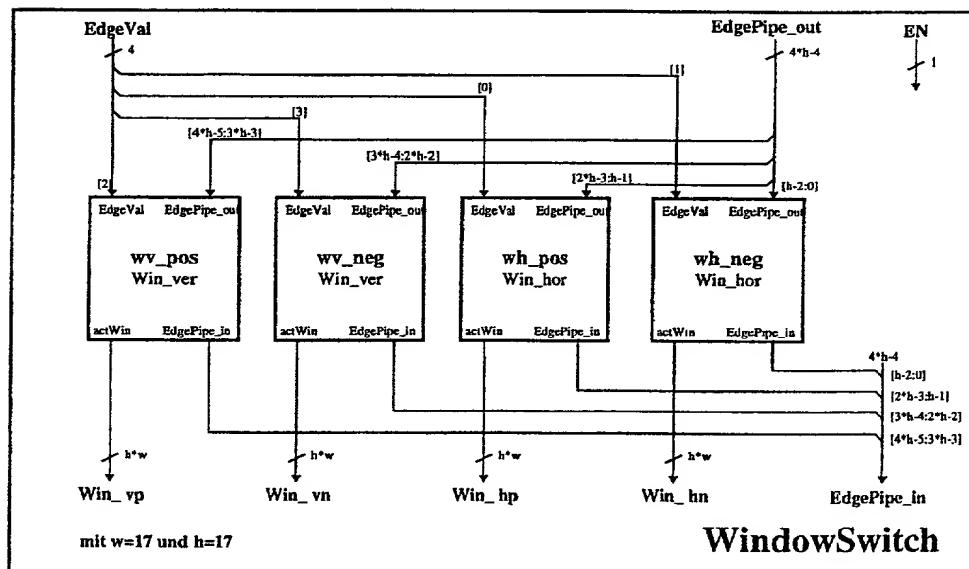


Fig. 31

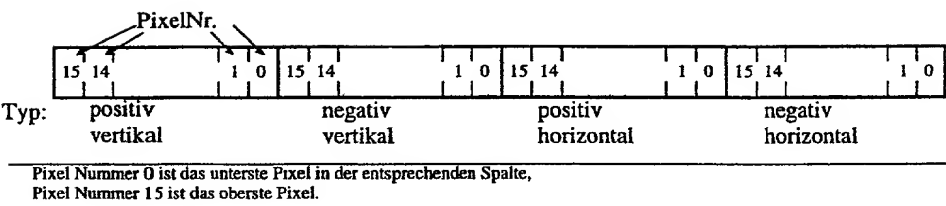


Fig. 32

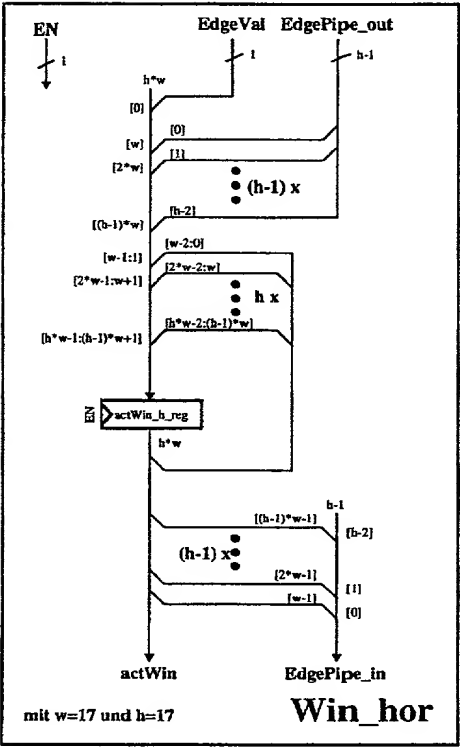


Fig. 33

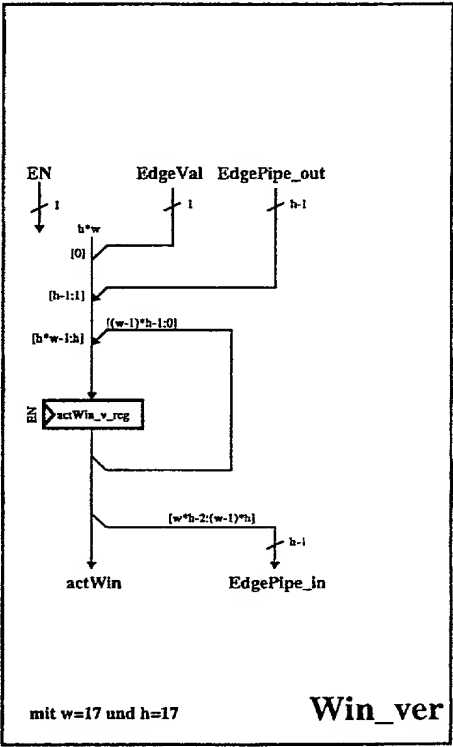


Fig. 34

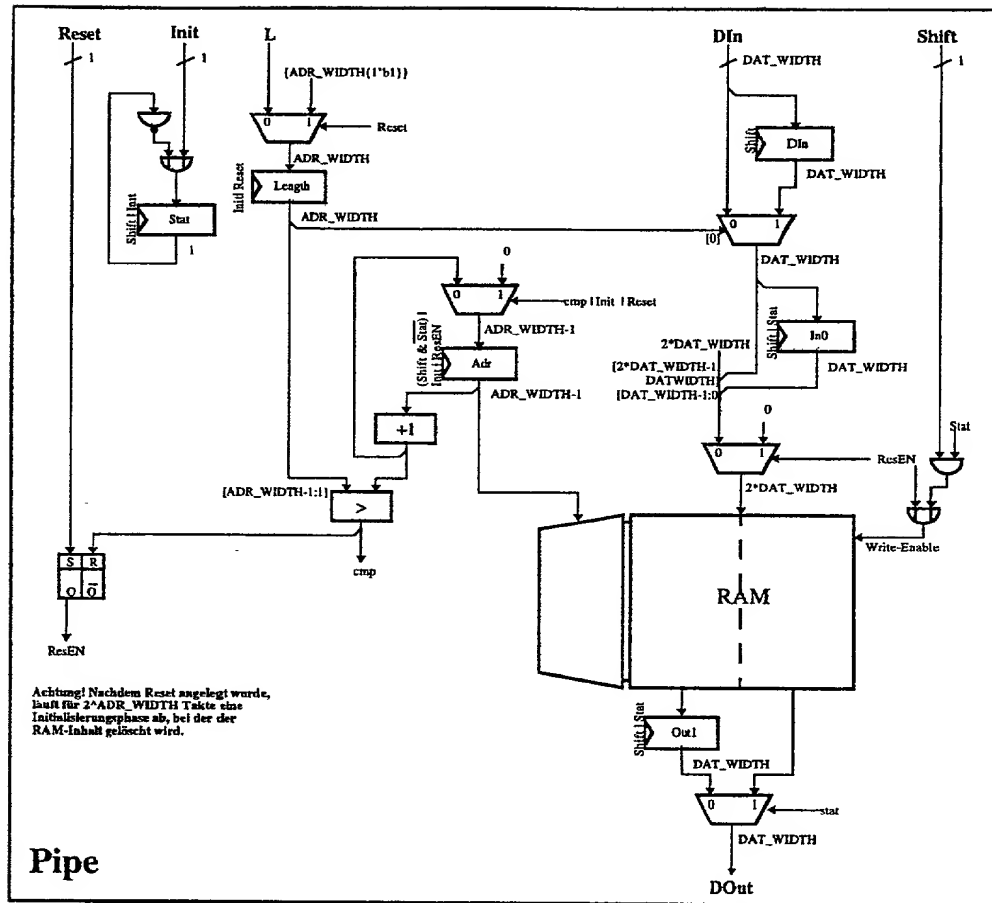


Fig. 35

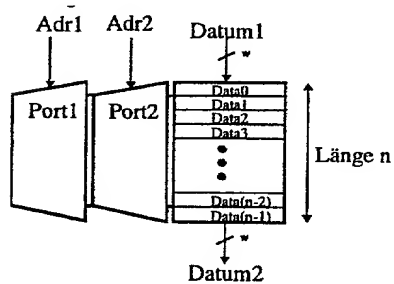


Fig. 36

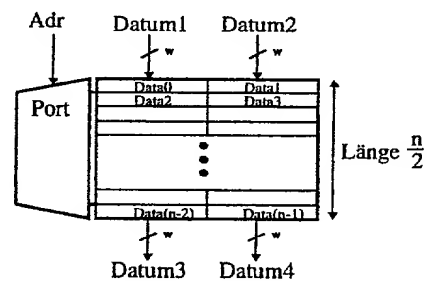


Fig. 37

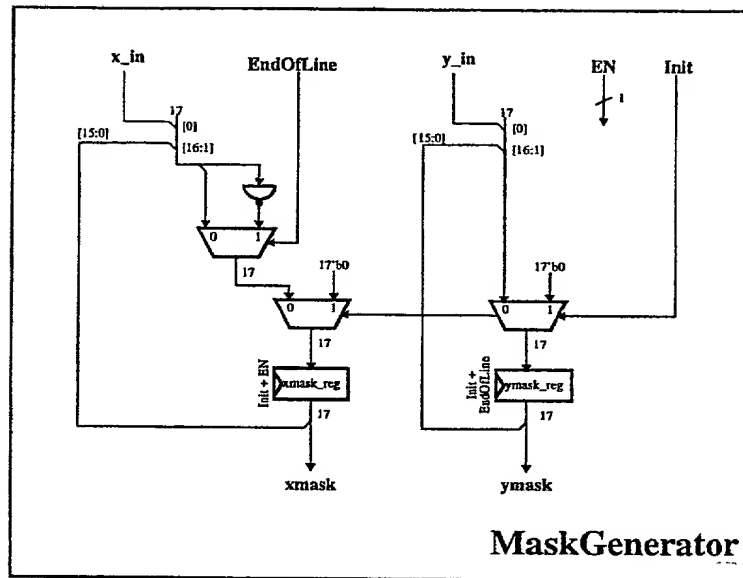


Fig. 38

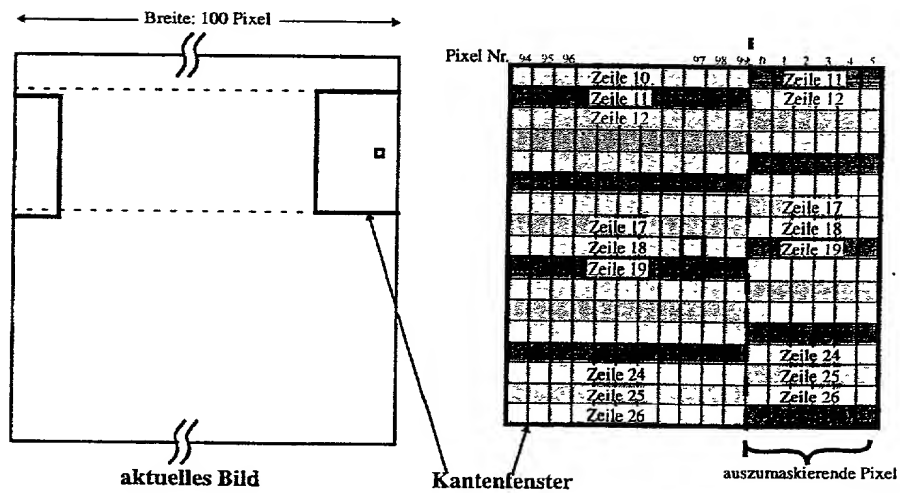


Fig. 39





Fig. 41



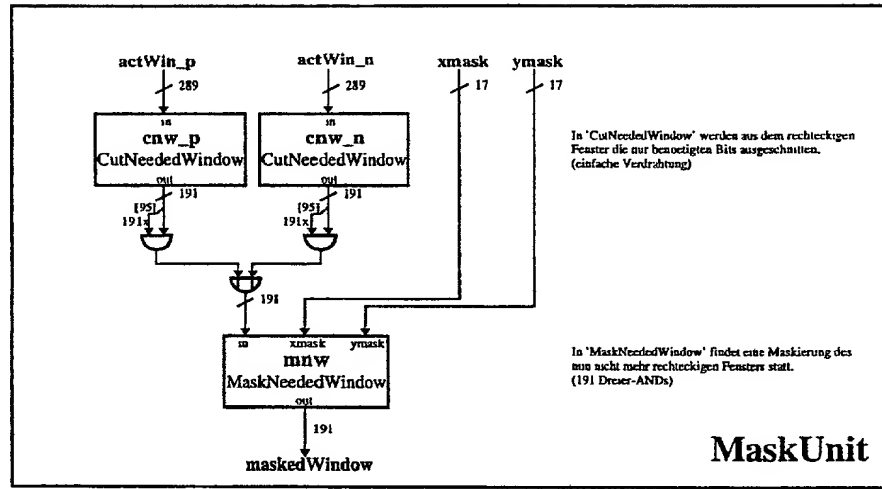


Fig. 42

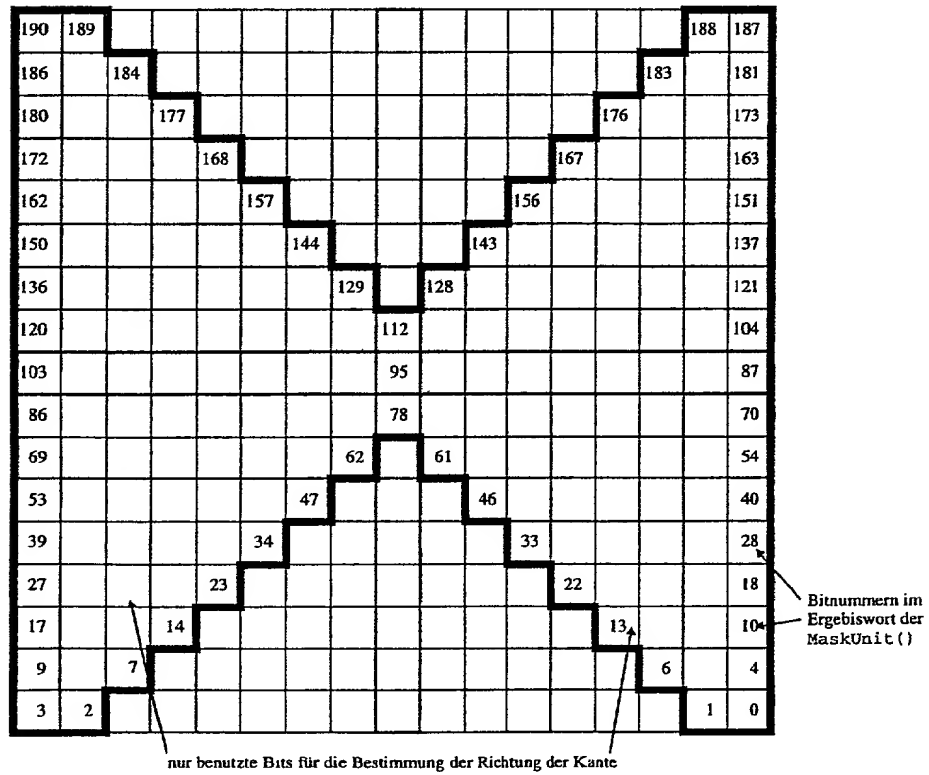


Fig. 43

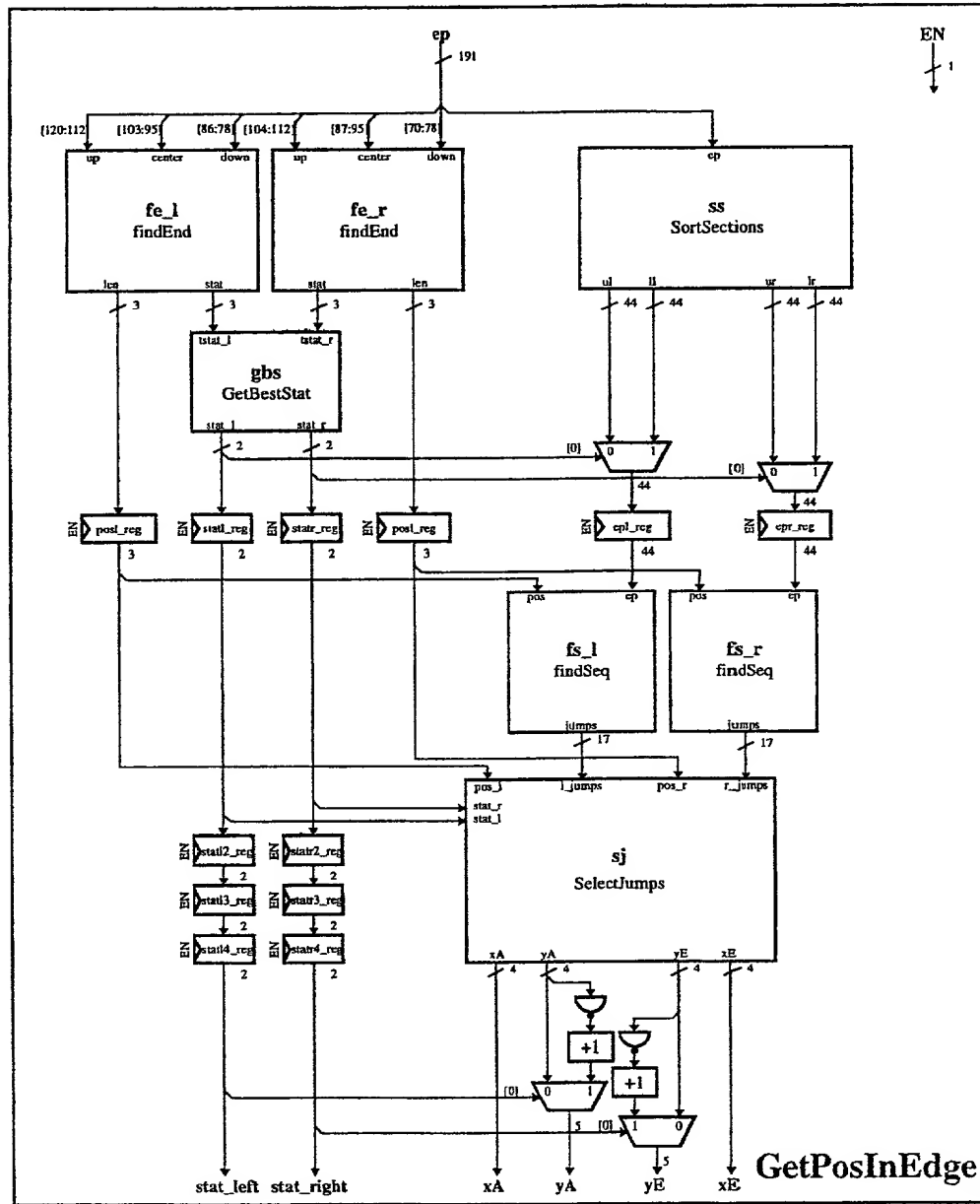


Fig. 44

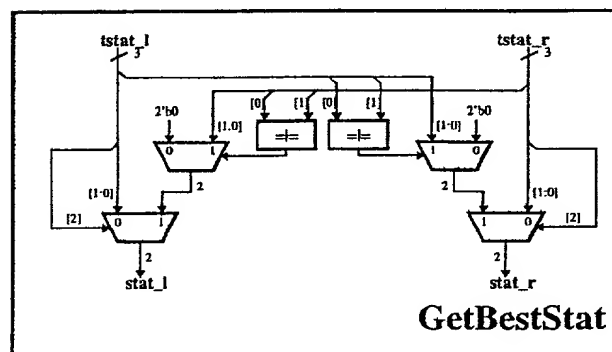


Fig. 45

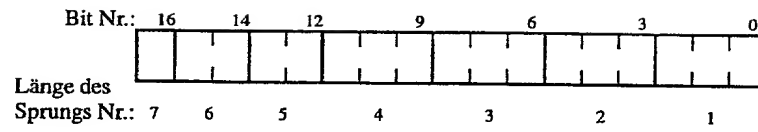


Fig. 46

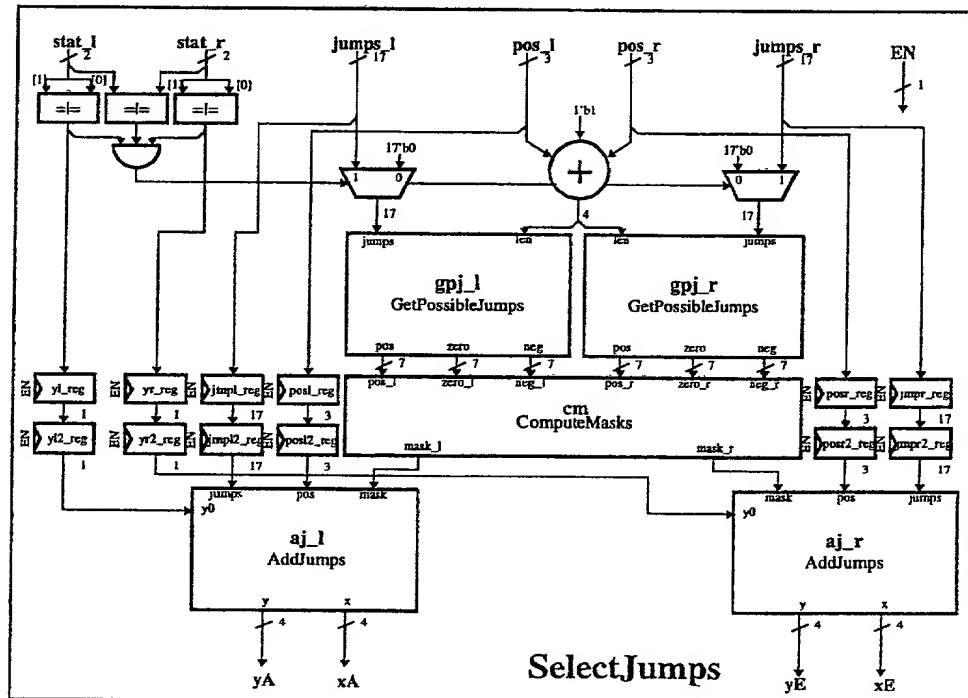


Fig. 47

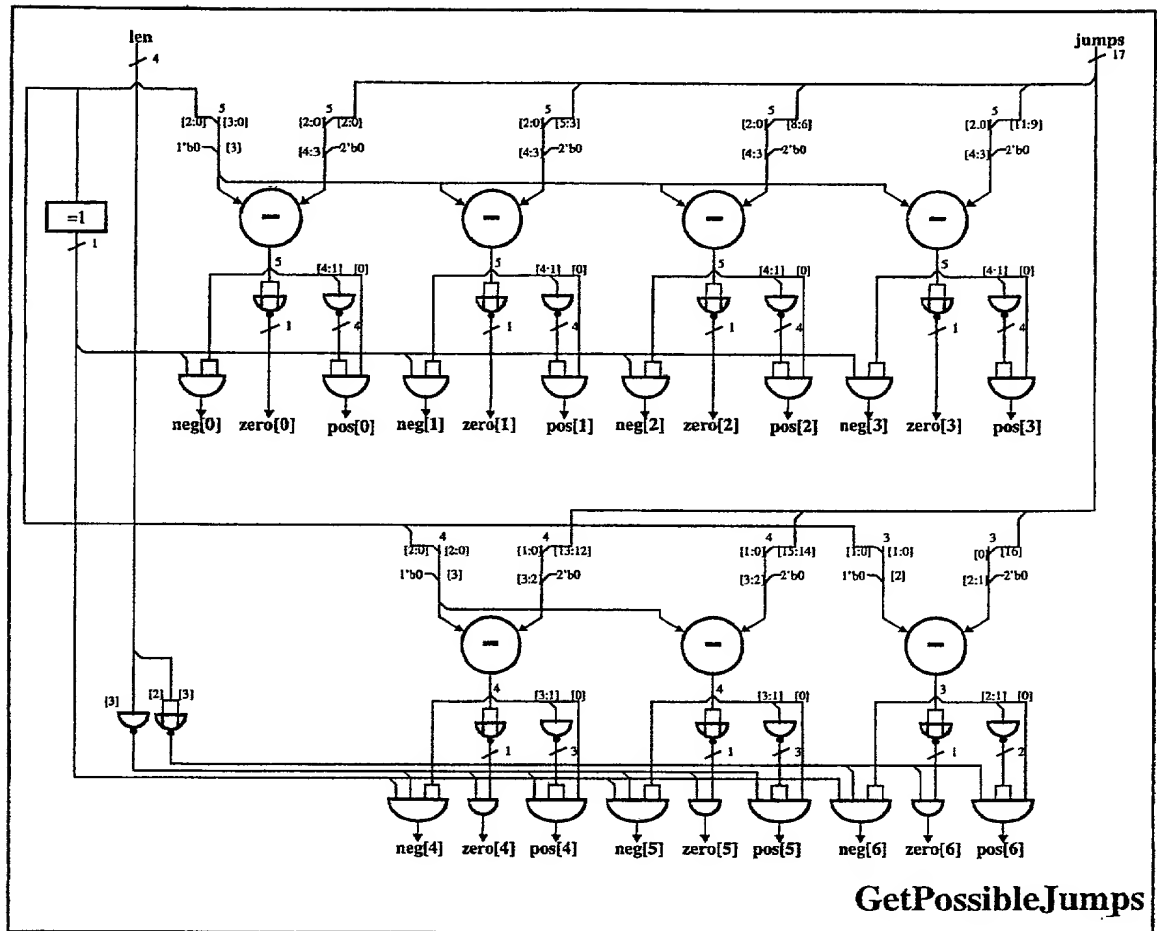


Fig. 48

Fig. 49

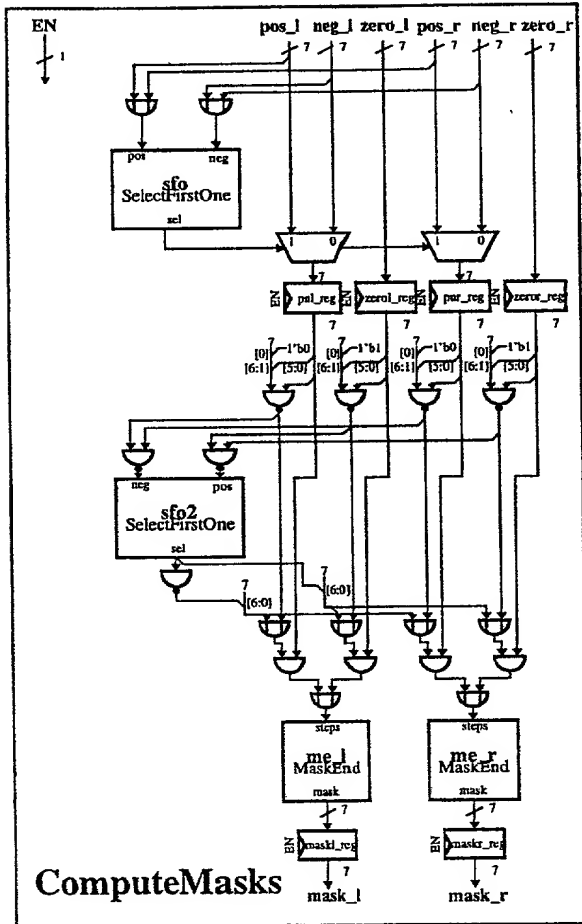
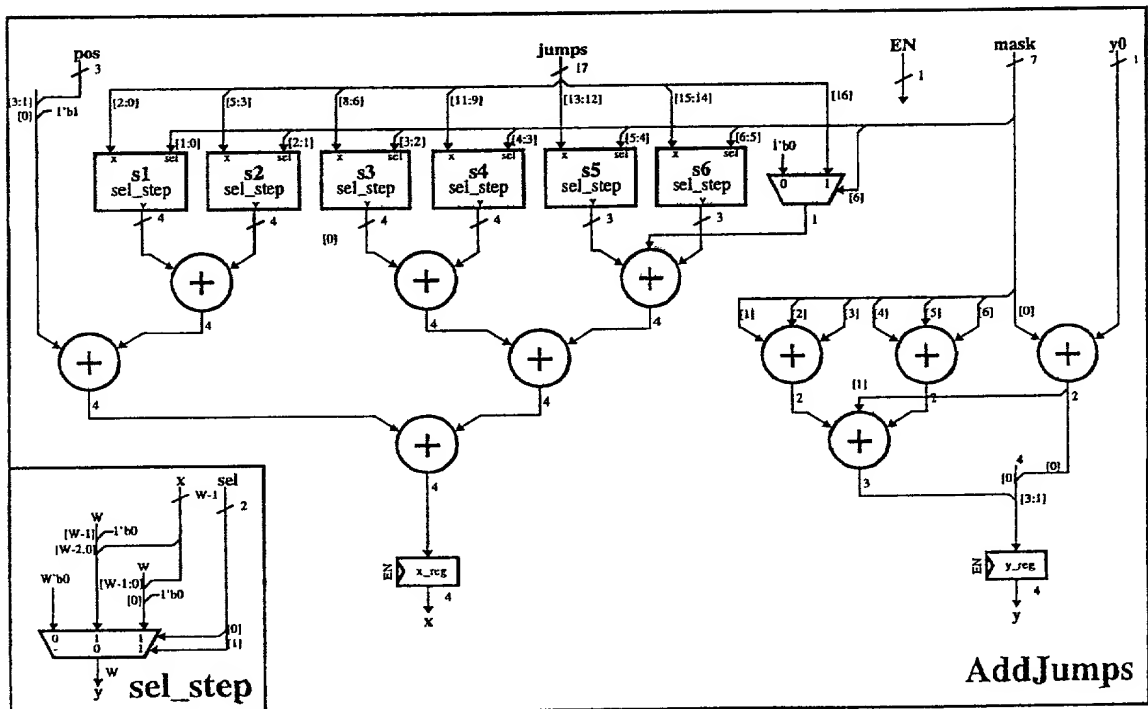
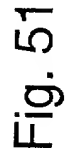


Fig. 50





## ComputeMixFactor

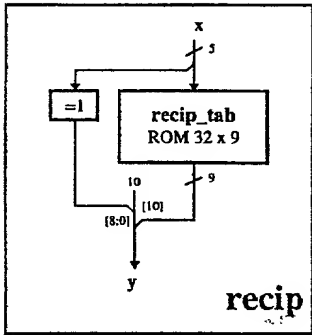


Fig. 52

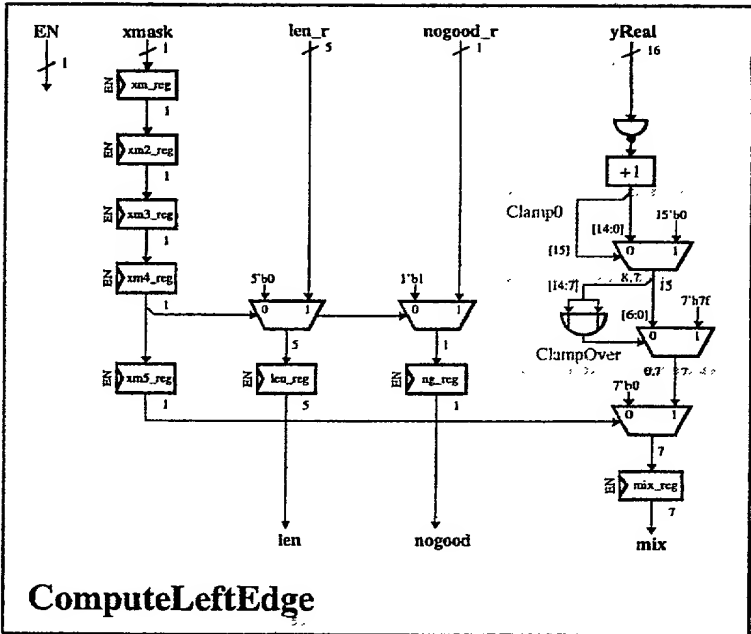


Fig. 53

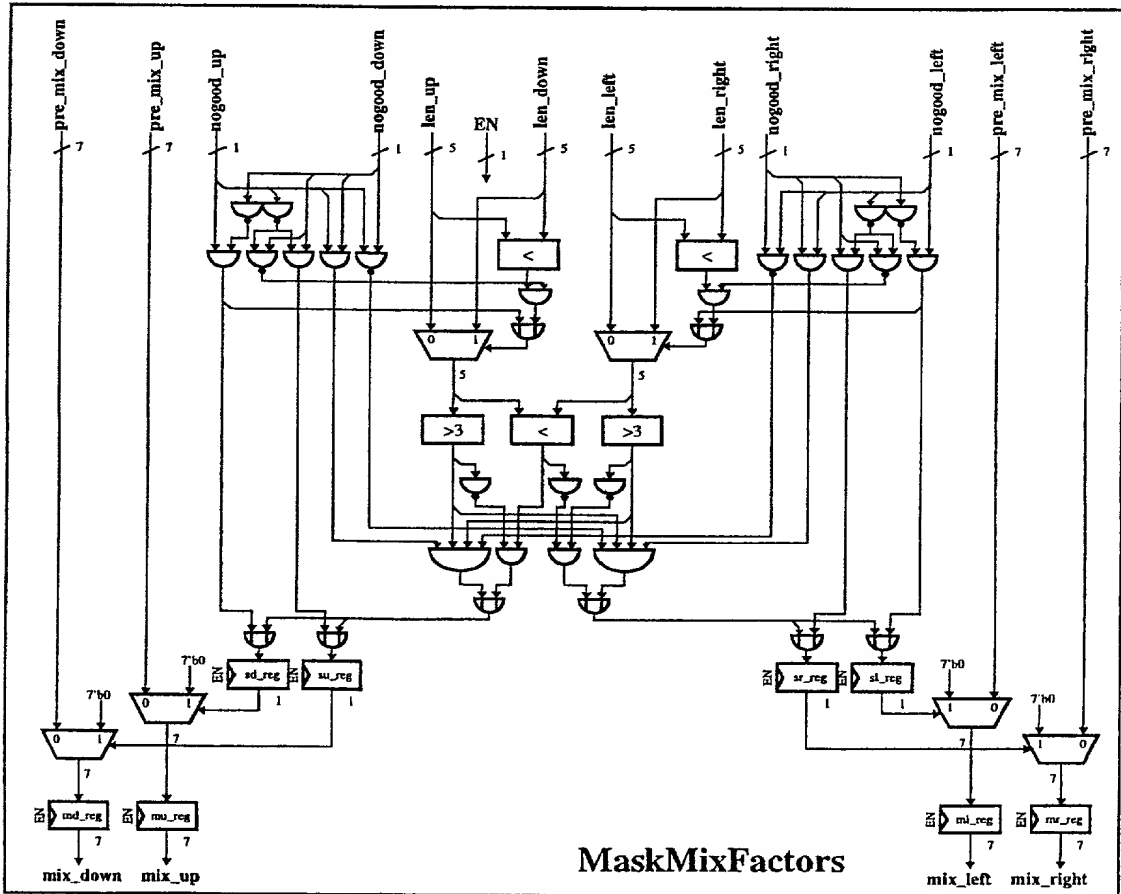


Fig. 54



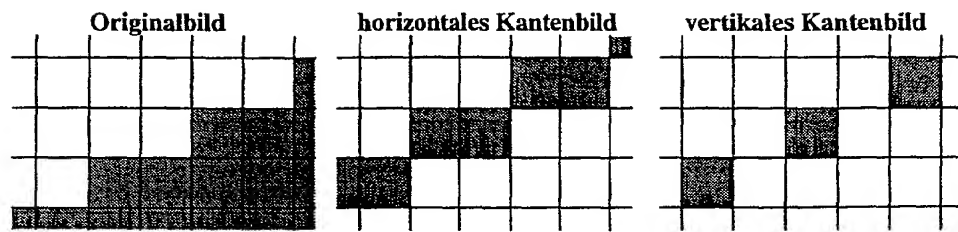


Fig. 55

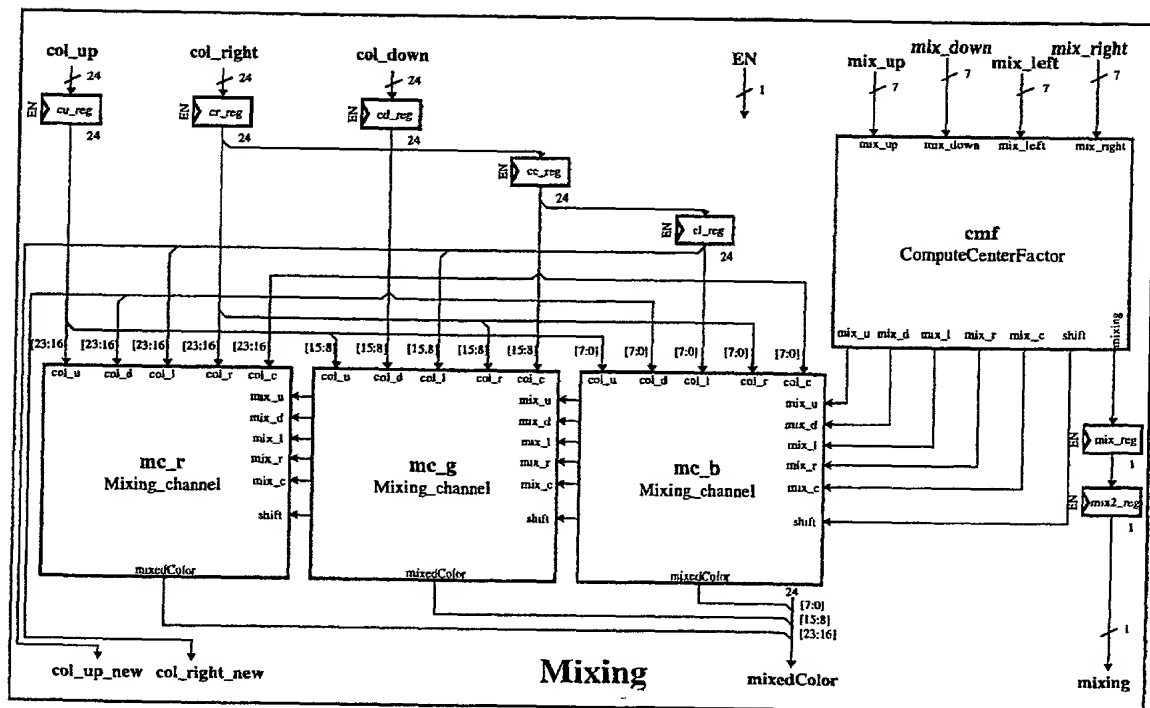


Fig. 56

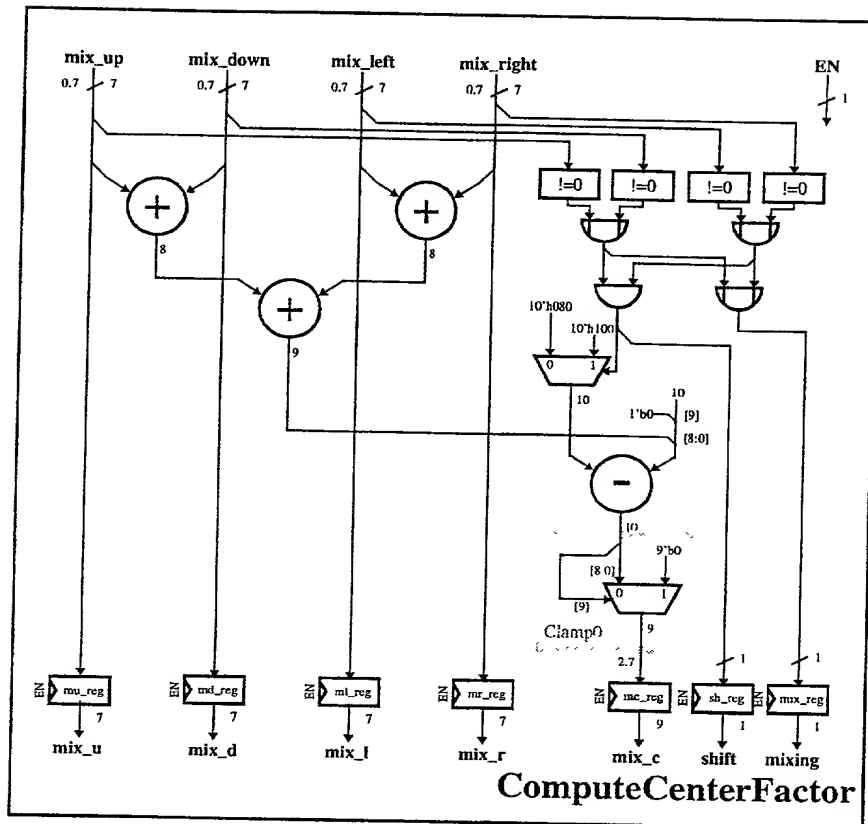
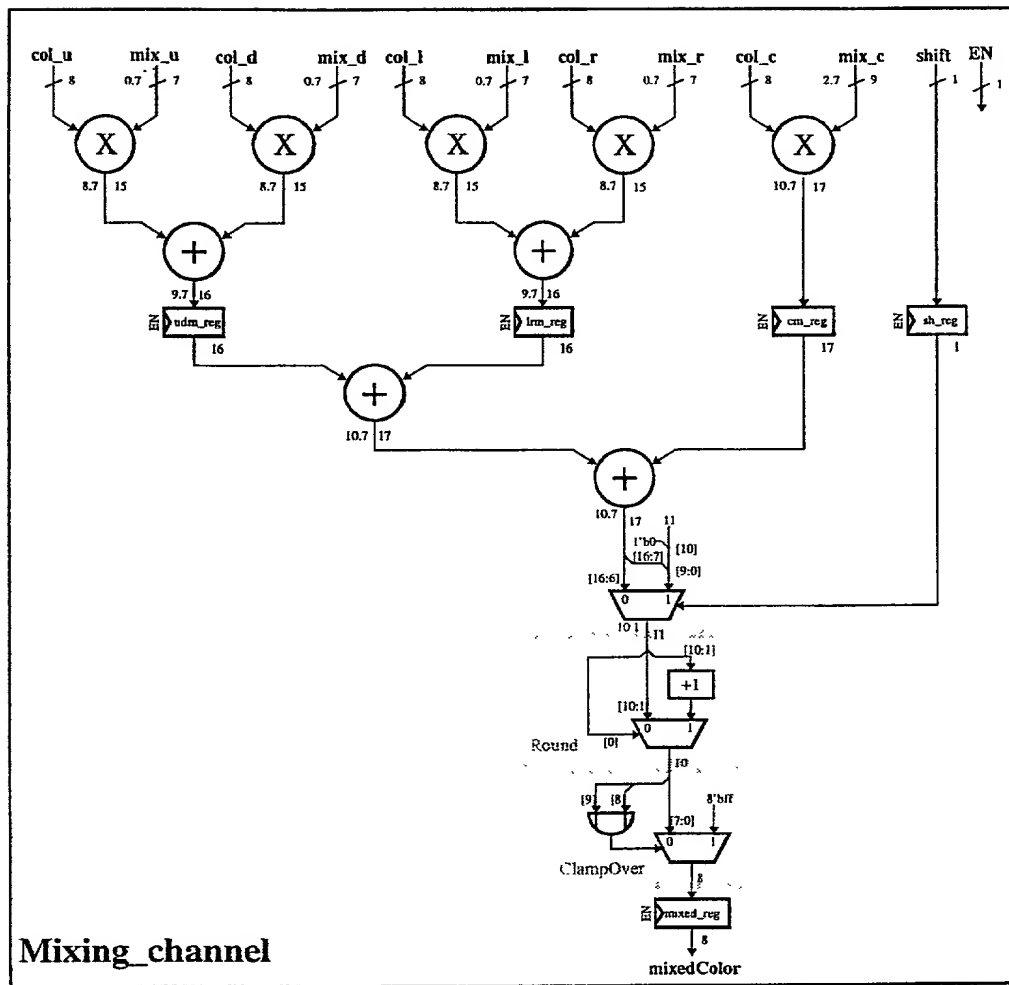


Fig. 57



Mixing\_channel

Fig. 58

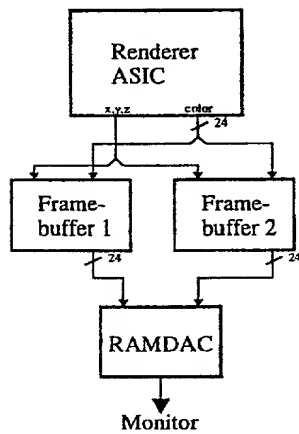


Fig. 59

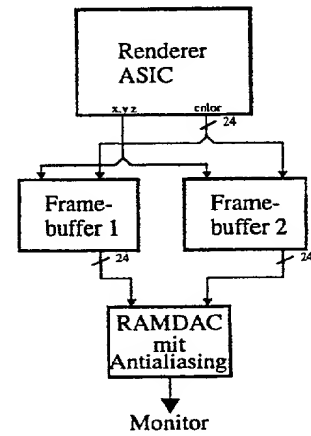


Fig. 60

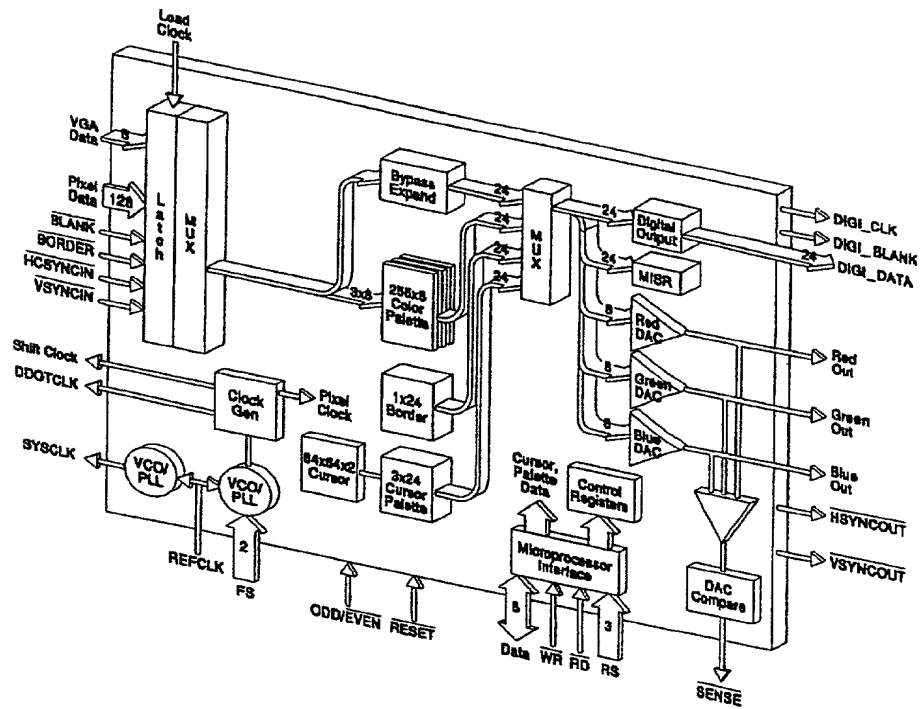


Fig. 61

Fig. 62

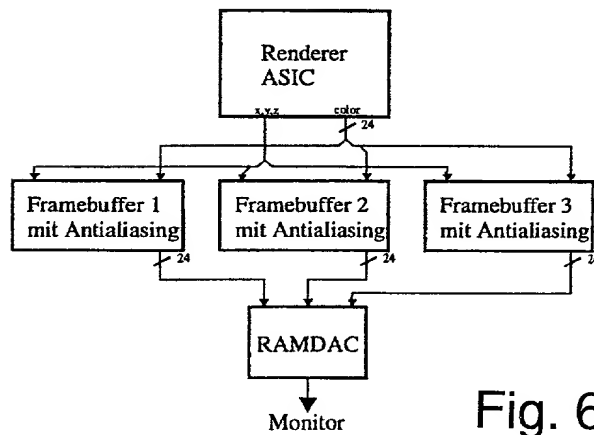
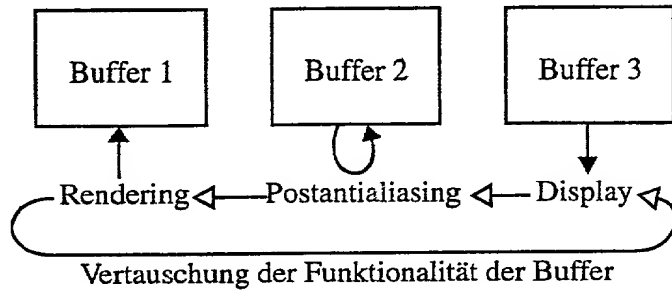
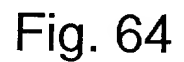


Fig. 63



31/44

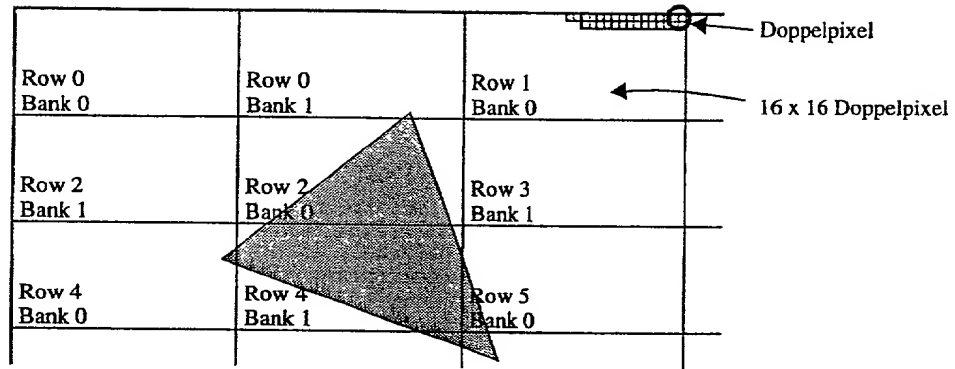


Fig. 65

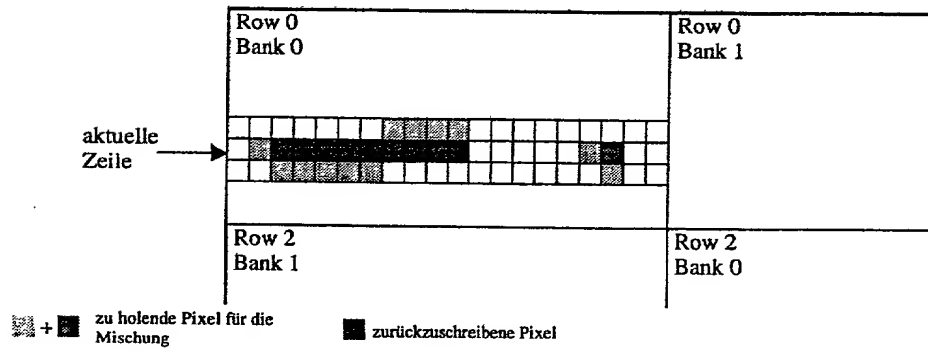
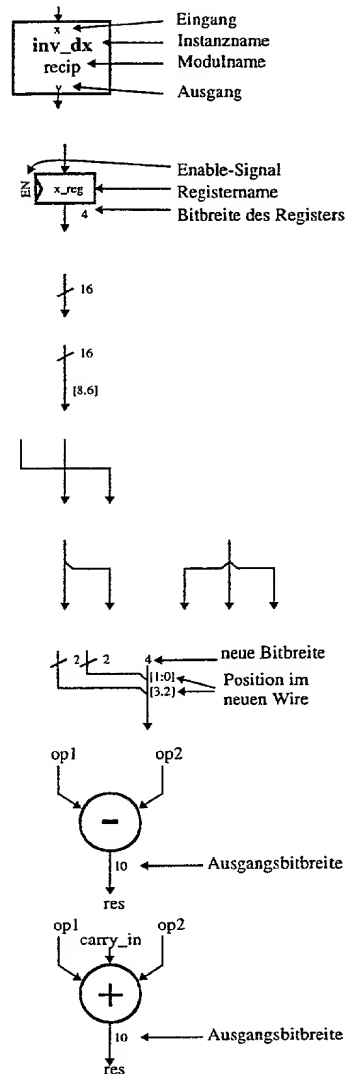


Fig. 66



Instanziierung eines selbstdefinierten Moduls

Register; das am Eingang liegende Datum wird bei der positiven Taktflanke übernommen, falls das Enable-Signal gesetzt ist

Bitbreite eines Drahtes (Wires)

Auswahl von Bits eines Wires

sich kreuzende Wires, ohne eine galvanische Verbindung

Verzweigung eines Drahtes

Konkatenation von Bits

Subtraktion ( $res = op1 - op2$  / und nicht andersherum)

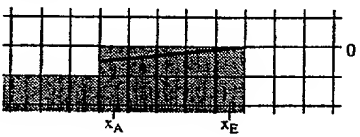
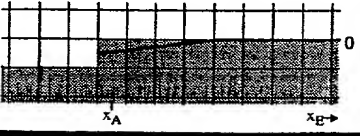
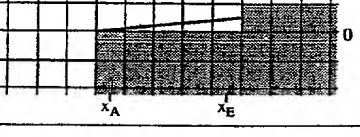
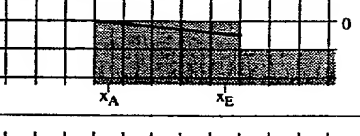
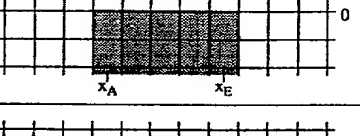
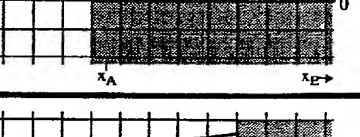
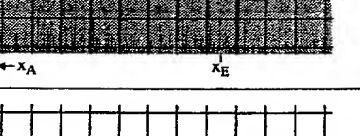
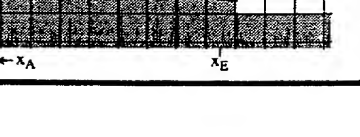
Addition (der mittlere Eingang ist lediglich ein carry-Eingang, und damit nur 1 Bit breit, aufwandsmäßig zählt dieses Element wie eine Addition zweier Zahlen)

Fig. 67

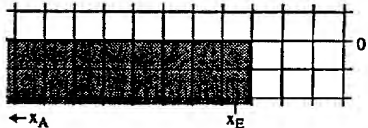
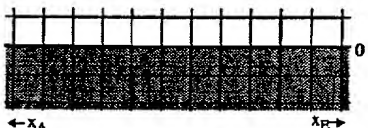
Anfangs-status	End-status	Gerade durch die Punkte	Beispiel
UP	UP	$(x_A - 0.5, 0.5) - (0.5 \cdot (x_A + x_E), 0)$ für $x \leq 0.5 \cdot (x_A + x_E)$ $(0.5 \cdot (x_A + x_E), 0) - (x_E + 0.5, 0.5)$ für $x > 0.5 \cdot (x_A + x_E)$	
UP	DOWN	$(x_A - 0.5, 0.5) - (x_E + 0.5, -0.5)$	
UP	NO	$(x_A - 0.5, 0.5) - (x_E + 0.5, 0)$	
UP	HOR	$(x_A - 0.5, 0.5) - (x_A + 0.5 \cdot (n-2), 0)$	
DOWN	UP	$(x_A - 0.5, -0.5) - (x_E + 0.5, 0.5)$	
DOWN	DOWN	$(x_A - 0.5, -0.5) - (0.5 \cdot (x_A + x_E), 0)$ für $x \leq 0.5 \cdot (x_A + x_E)$ $(0.5 \cdot (x_A + x_E), 0) - (x_E + 0.5, -0.5)$ für $x > 0.5 \cdot (x_A + x_E)$	

Tab. 1



Anfangs-status	End-status	Gerade durch die Punkte	Beispiel
DOWN	NO	$(x_A - 0.5, -0.5) - (x_E + 0.5, 0)$	
DOWN	HOR	$(x_A - 0.5, -0.5) - (x_A + 0.5 * (n-2), 0)$	
NO	UP	$(x_A - 0.5, 0) - (x_E + 0.5, 0.5)$	
NO	DOWN	$(x_A - 0.5, 0) - (x_E + 0.5, -0.5)$	
NO	NO	$y \equiv 0$	
NO	HOR	$y \equiv 0$	
HOR	UP	$(x_E - 0.5 * (n-2), 0) - (x_E + 0.5, 0.5)$	
HOR	DOWN	$(x_E - 0.5 * (n-2), 0) - (x_E + 0.5, -0.5)$	

Tab. 2

Anfangs-status	End-status	Gerade durch die Punkte	Beispiel
HOR	NO	$y \equiv 0$	
HOR	HOR	$y \equiv 0$	

Tab. 3

Signal	Bits	Type	Beschreibung
Init	1	In	Initialisierungssignal (Übernahme einer neuen Höhe und Breite)
width	11	In	neue Bildschirmbreite (nur relevant bei Init=1)
height	11	In	neue Bildschirmhöhe (nur relevant bei Init=1)
Color	24	In	Farbwert eines Pixels
Valid_in	1	In	Gültigkeitsanzeige des Color-Signals
mixedColor	24	Out	antialiaster Farbwert eines Pixels
Valid	1	Out	Gültigkeitsanzeige des mixedColor-Signals

Tab. 4

Signal	Bits	Type	Beschreibung
EN	1	In	Enable-Signal der Zähler
Init	1	In	Initialisierungssignal (Übernahme der neuen Breite und Höhe)
width	11	In	neue Bildschirmbreite (nur relevant bei Init=1)
height	11	In	neue Bildschirmhöhe (nur relevant bei Init=1)
rightValid	1	Out	Gültigkeitsanzeige des Pixels rechts vom aktuellen
downValid	1	Out	Gültigkeitsanzeige des Pixels unter dem aktuellen
Ready	1	Out	Anzeige, daß alle Pixel des aktuellen Bildes eingelesen wurden

Tab. 5

Signal	Bits	Type	Beschreibung
EN	1	In	Enable-Signal der Register
col_right	24	In	Farbwert für das Pixel rechts vom aktuellen
col_down	24	In	Farbwert für das Pixel unter dem aktuellen
rightValid	1	In	Gültigkeitsanzeige vom col_right-Signal
downValid	1	In	Gültigkeitsanzeige vom col_down-Signal
EdgeVal	4	Out	Kanteninformation für das aktuelle Pixel
col_right_new	24	Out	Farbwert, der für die Kantengenerierung in der nächsten Zeile erneut gebraucht wird
color	24	Out	Farbwert, der für die spätere Mischung aufbewahrt werden soll

Tab. 6

Signal	Bits	Type	Beschreibung
EN	1	In	Enable-Signal des Moduls
color0	24	In	Farbe des einen Pixels
color1	24	In	Farbe des anderen Pixels, zwischen denen eine Kante erkannt werden soll
cmp	1	Out	Anzeige, ob zwischen den beteiligten Pixeln eine Kante existiert

Tab. 7

Signal	Bits	Type	Beschreibung
EN	1	In	Enable-Signal des Moduls
r_color	24	In	Farbe des rechten Pixels
c_color	24	In	Farbe des zentralen Pixels
d_color	24	In	Farbe des unteren Pixels
r_pos	1	Out	vom zentralen zum rechten Pixel existiert ein positiver Farbsprung
r_neg	1	Out	vom zentralen zum rechten Pixel existiert ein negativer Farbsprung
d_pos	1	Out	vom zentralen zum unteren Pixel existiert ein positiver Farbsprung
d_neg	1	Out	vom zentralen zum unteren Pixel existiert ein negativer Farbsprung

Tab. 8

Tab. 9Tab. 10Tab. 11

Signal	Bits	Type	Beschreibung
Reset	1	In	Reset-Signal, nach Anlegen dieses Signals erfolgt eine Initialisierungsphase des RAMs
Init	1	In	Initialisierungssignal, bei dem die Länge der Pipe neu festgelegt wird.
L	?	In	neue Länge der verwendeten Pipe (Bitbreite über Parameter festlegbar)
Shift	1	In	Signal für das Weiterschalten der Daten (neues Datum wird übernommen, ein Datum wird ausgegeben)
DIn	?	In	Daten-Eingang der Pipe (Bitbreite über Parameter festlegbar)
DOut	?	Out	Daten-Ausgang der Pipe (Bitbreite über Parameter festlegbar)

Tab. 12

Signal	Bits	Type	Beschreibung
EN	1	In	Enable-Signal der Register
Init	1	In	Initialisierungssignal für die Masken
x_in	1	In	neuer Wert für die x-Maske
y_in	1	In	neuer Wert für die y-Maske
EndOfLine	1	In	Signal, das anzeigt, daß das Ende einer Bildzeile erreicht ist.
xmask	17	Out	Maske, die horizontal angibt, welche Pixel zur aktuellen Umgebung gehören
ymask	17	Out	Maske, die vertikal angibt, welche Pixel zur aktuellen Umgebung gehören

Tab. 13

Signal	Bits	Type	Beschreibung
EN	1	In	Enable-Signal der Zähler
Init	1	In	Initialisierungssignal (Übernahme der neuen Breite und Höhe)
width	11	In	neue Breite (nur relevant bei Init=1)
height	11	In	neue Höhe (nur relevant bei Init=1)
EndOfLine	1	Out	Signal, das anzeigt, daß das Ende einer Bildzeile erreicht ist.
x_in	1	Out	neuer Wert für die x-Maske
y_in	1	Out	neuer Wert für die y-Maske
Valid	1	Out	Ist das aktuelle Pixel überhaupt gültig (innerhalb der Bildgrenzen) ?

Tab. 14

Signal	Bits	Type	Beschreibung
EN	1	In	Enable-Signal des Moduls
Win_p	289	In	positiv markierte Pixel im Kantenfenster
Win_n	289	In	negativ markierte Pixel im Kantenfenster
xmask	17	In	x-Maske (Gültigkeit der Pixel im Kantenfenster)
ymask	17	In	y-Maske (Gültigkeit der Zeilen im Kantenfenster)
yReal	16	Out	Position der Geraden bzgl. des Farbsprunges
mix	7	Out	Mischfaktor, der angibt, wieviel von der Farbe aus der entsprechenden Richtung zugemischt werden sollte (falls nur diese Gerade existiert)
len	5	Out	horizontale Länge der verfolgten Geraden
nogood	1	Out	Flag, das angibt, ob die Gerade als „gut“ angesehen wird

Tab. 15

Signal	Bits	Type	Beschreibung
actWin_p	289	In	positiv markierte Pixel im Kantenfenster
actWin_n	289	In	negativ markierte Pixel im Kantenfenster
xmask	17	In	Gültigkeit der Pixel im Fenster
ymask	17	In	Gültigkeit der Zeilen im Fenster
maskedWindow	191	Out	maskiertes Kantenfenster

Tab. 16

Signal	Bits	Type	Beschreibung
EN	1	In	Enable-Signal der Register
ep	191	In	Kantenfenster (edge pic / nicht mehr rechteckig)
stat_left	2	Out	Status am linken Ende der verfolgten Stufe
stat_right	2	Out	Status am rechten Ende der verfolgten Stufe
xA	4	Out	x-Wert des Anfangspunktes (eigentlich -xA, aber Vorzeichen wird nicht benötigt / Wertebereich: 0..7,5)
yA	5	Out	y-Wert des Anfangspunktes (Wertebereich: -7,5..+7,5)
xE	4	Out	x-Wert des Endpunktes (Wertebereich: 0..7,5)
yE	5	Out	y-Wert des Endpunktes (Wertebereich: -7,5..+7,5)

Tab. 17

Signal	Bits	Type	Beschreibung
up	9	In	Zeile im Kantenbild über der mittleren
center	9	In	mittlere Zeile im Kantenbild in eine Richtung
down	9	In	Zeile im Kantenbild unter der mittleren
len	3	Out	Länge der zentralen Stufe in der verfolgten Richtung
stat	3	Out	Status am Ende der zentralen Stufe

Tab. 18

Signal	Bits	Type	Beschreibung
tstat_l	3	In	temporärer Status nach links
tstat_r	3	In	temporärer Status nach rechts
stat_l	2	Out	Status am linken Ende der verfolgten Stufe
stat_r	2	Out	Status am rechten Ende der verfolgten Stufe

Tab. 19

tstat	Bits[2:0]
UP	010
DOWN	001
NO	000
HOR	011
BOTH	100

Tab. 20

stat	Bits[1:0]
UP	10
DOWN	01
NO	00
HOR	11

Tab. 21

Signal	Bits	Type	Beschreibung
pos	3	In	Position, an der die zentrale Stufe endet
ep	44	In	Sektor aus dem Kantenbild, in dem weitere Stufen gefunden werden sollen
jumps	17	Out	im Sektor gefundene Sprünge

Tab. 22

Tab. 23Tab. 24Tab. 25



Signal	Bits	Type	Beschreibung
EN	1	In	Enable-Signal der Register
pos	3	In	x-Wert des Endes der zentralen Stufe
y0	1	In	y-Wert des Endes der zentralen Stufe
jumps	17	In	weitere Stufen in die entsprechende Richtung
mask	7	In	Maske, die angibt, welche der Stufen in jumps zur Geraden beitragen
x	4	Out	x-Wert des einen Endpunktes der Geraden
y	4	Out	Betrag des y-Wert des einen Endpunktes der Geraden

Tab. 26

Signal	Bits	Type	Beschreibung
EN	1	In	Enable-Signal der Register
xA	4	In	x-Wert des Anfangspunktes
yA	5	In	y-Wert des Anfangspunktes
xE	4	In	x-Wert des Endpunktes
yE	5	In	y-Wert des Endpunktes
stat_left	2	In	Status am Anfangspunkt
stat_right	2	In	Status am Endpunkt
yReal	16	Out	y-Wert der realen Geraden beim aktuellen Pixel
mix	7	Out	Mischfaktor für eine Zumischrichtung bzgl. der Geraden
len	5	Out	Länge der verfolgten Geraden
no_good	1	Out	Stati an den Enden der Geraden deuten auf keine „gutartige“ Gerade hin

Tab. 27

Signal	Bits	Type	Beschreibung
x	5	In	Eingangswert
y	10	Out	Ergebniswert $y = \frac{1}{x}$

Tab. 28

Tab. 29

Tab. 30

Signal	Bits	Type	Beschreibung
EN	1	In	Enable-Signal der Register
mix_up, mix_down, mix_left, mix_right	je 7	In	Mischfaktoren für die entsprechenden Richtungen
col_up	24	In	Farbe des Pixels über dem aktuellen
col_right	24	In	Farbe des Pixels rechts vom aktuellen
col_down	24	In	Farbe des Pixels unter dem aktuellen
mixedColor	24	Out	neue Farbe des aktuellen Pixels aufgrund der Mischung
mixing	1	Out	Flag, ob eine Mischung stattfand (im Triple-Buffer-Betrieb die Entscheidung, ob das Pixel zurückgeschrieben werden muß)
col_up_new	24	Out	Farbe, die in der nächsten Zeile als oberstes Pixel verwendet wird
col_right_new	24	Out	Farbe, die in der nächsten Zeile als rechtes Pixel verwendet wird

Tab. 31

Signal	Bits	Type	Beschreibung
EN	1	In	Enable-Signal der Register
mix_up, mix_down, mix_left, mix_right	je 7	In	Mischfaktoren für die entsprechenden Richtungen
mix_u, mix_d, mix_l, mix_r	je 7	Out	um einen Takt verzögerte Mischfaktoren
mix_c	7	Out	zentraler Mischfaktor
shift	1	Out	Flag, ob die Mischfaktoren noch alle durch zwei dividiert werden müssen
mixing	1	Out	Flag, ob überhaupt eine Mischung stattfindet, oder ob der zentrale Faktor 1.0 ist

Tab. 32

Signal	Bits	Type	Beschreibung
EN	1	In	Enable-Signal der Register
mix_u, mix_d, mix_l, mix_r, mix_c	je 7	In	Mischfaktoren für die entsprechenden Pixel
col_u, col_d, col_l, col_r, col_c	je 8	In	Farben der einzelnen Pixel im jeweiligen Farbkanal
shift	1	In	Flag, daß noch eine Division durch 2 stattfinden muß
mixedColor	8	Out	gemischte Farbe für den Farbkanal

Tab. 33

**DECLARATION AND POWER OF ATTORNEY  
FOR PATENT APPLICATIONS**

PATENT

Docket No. : 35671/DBP/E43

As a below named inventor, I hereby declare that:

My residence, post office address and citizenship are as stated below next to my name.

I believe I am the original, first and sole inventor (if only one name is listed below) or an original, first and joint inventor (if plural names are listed below) of the subject matter which is claimed and for which a patent is sought on the invention entitled VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUM ELIMINIEREN UNERWUNSCHTER STUFUNGEN AN KANTEN BEI BILDDARSTELLUNGEN IM ZEILENRASTER, the specification of which is attached hereto unless the following is checked:

\_\_\_ was filed on \_\_\_ as United States Application Number or PCT International Application Number \_\_\_ and was amended on \_\_\_ (if applicable).

I hereby state that I have reviewed and understand the contents of the above-identified specification, including the claims, as amended by any amendment referred to above.

I acknowledge the duty to disclose information which is material to patentability as defined in 37 CFR § 1.56.

I hereby claim foreign priority benefits under 35 U.S.C. § 119(a)-(d) or § 365(b) of the foreign application(s) for patent or inventor's certificate, or § 365(a) of any PCT International application which designated at least one country other than the United States, listed below and have also identified below, any foreign application for patent or inventor's certificate, or PCT International application having a filing date before that of the application on which priority is claimed.

Prior Foreign Application(s)

<u>Application Number</u>	<u>Country</u>	<u>Filing Date (day/month/year)</u>	<u>Priority Claimed</u>
198 40 529.4	Germany	30.August.1998	Yes

I hereby claim the benefit under 35 U.S.C. § 119(e) of any United States provisional application(s) listed below.

<u>Application Number</u>	<u>Filing Date</u>
---------------------------	--------------------

I hereby claim the benefit under 35 U.S.C. § 120 of any United States application(s), or any PCT International application designating the United States, listed below and, insofar as the subject matter of each of the claims of this application is not disclosed in the prior United States or PCT International application in the manner provided by the first paragraph of 35 U.S.C. § 112, I acknowledge the duty to disclose information which is material to patentability as defined in 37 CFR § 1.56 which became available between the filing date of the prior application and the national or PCT International filing date of this application:

<u>Application Number</u>	<u>Filing Date</u>	<u>Patented/Pending/Abandoned</u>
---------------------------	--------------------	-----------------------------------

**POWER OF ATTORNEY:** I hereby appoint the following attorneys and agents of the law firm CHRISTIE, PARKER & HALE, LLP to prosecute this application and any international application under the Patent Cooperation Treaty based on it and to transact all business in the U.S. Patent and Trademark Office connected with either of them in accordance with instructions from the assignee of the entire interest in this application;

**DECLARATION AND POWER OF ATTORNEY  
FOR PATENT APPLICATIONS**

**Docket No. 35671/DBP/E43**

or from the first or sole inventor named below in the event the application is not assigned; or from EISENFUHR, SPEISER & PARTNER in the event the power granted herein is for an application filed on behalf of a foreign attorney or agent.

R. W. Johnston	(17,968)	John D. Carpenter	(34,133)	Lucinda G. Auciello	(42,270)
D. Bruce Prout	(20,958)	David A. Plumley	(37,208)	Norman E. Carte	(30,455)
Hayden A. Carney	(22,653)	Wesley W. Monroe	(39,778)	Joel A. Kauth	(41,886)
Richard J. Ward, Jr.	(24,187)	John W. Eldredge	(37,613)	Patrick Y. Ikehara	(42,681)
Russell R. Palmer, Jr.	(22,994)	Gregory S. Lampert	(35,581)	Mark Garscia	(31,953)
LeRoy T. Rahn	(20,356)	Grant T. Langton	(39,739)	Gary J. Nelson	(44,257)
Richard D. Seibel	(22,134)	Constantine Marantidis	(39,759)	Raymond R. Tabandeh	(43,945)
Walter G. Maxwell	(25,355)	Daniel R. Kimbell	(34,849)	Phuong-Quan Hoang	(41,839)
William P. Christie	(29,371)	Craig A. Gelfound	(41,032)	Jun-Young E. Jeon	(43,693)
David A. Dillard	(30,831)	Syed A. Hasan	(41,057)	Kathy Mojibi	(41,409)
Thomas J. Daly	(32,213)	Kathleen M. Olster	(42,052)	Cynthia A. Bonner	(P-44,548)
Vincent G. Gioia	(19,959)	Daniel M. Cavanagh	(41,661)		
Edward R. Schwartz	(31,135)	Molly A. Holman	(40,022)		

The authority under this Power of Attorney of each person named above shall automatically terminate and be revoked upon such person ceasing to be a member or associate of or of counsel to that law firm.

**DIRECT TELEPHONE CALLS TO : D. Bruce Prout, 626/795-9900**  
**SEND CORRESPONDENCE TO : CHRISTIE, PARKER & HALE, LLP**  
**P.O. Box 7068, Pasadena, CA 91109-7068**

I declare that all statements made herein of my own knowledge are true and that all statements made on information and belief are believed to be true; and further that these statements were made with the knowledge that willful false statements and the like so made are punishable by fine or imprisonment, or both, under Section 1001 of Title 18 of the United States Code and that such willful false statements may jeopardize the validity of the application or any patent issued thereon.

Full name of sole or first joint inventor Markus Szymaniak	Inventor's signature	Date
Residence and Post Office Address Lissberger Zeile 4, D-13435 Berlin, Germany		Citizenship German

SFC PAS199756.1\*-8/30/99 3 51 pm